UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLE PRODUZIONI AGRARIE E ALIMENTARI

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

Valerio Quartarone

LA PHYTOREMEDIATION, UNA TECNICA SOSTENIBILE PER LA BONIFICA DEI TERRENI NEI SITI CONTAMINATI. POSSIBILI APPLICAZIONI NELL'AREA AD ELEVATO RISCHIO DI CRISI AMBIENTALE (AERCA) DI SIRACUSA

ELABORATO FINALE

Relatore

Prof. Paolo Guarnaccia

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

INDICE

1. INTRODUZIONE 5

2. LA PHYTOREMEDIATION 8

2.1. Iperaccumulo 9

2.2. Specie indicate per la phytoremediation 11

3. TECNICHE DI PHYTOREMEDIATION 15

3.1. Fitoestrazione 16

3.2. Fitostabilizzazione 17

3.3. Rizodegradazione 18

3.4. Fitodegradazione 19

3.5. Fitovolatilizzazione 20

3.6. Rizofiltrazione 20

4. FATTORI CHE INFLUENZANO LA PHYTOREMEDIATION 22

4.1. Pratiche agronomiche per ottimizzare il bioaccumulo 24

4.1.1. Scelta della coltura 24

4.1.2. pH e concimazione 25

4.1.3. Agenti chelanti 26

4.1.4. Semina 27

4.1.5. Rotazione colturale 28

4.1.6. Diserbo e irrigazione 29

4.1.7. Aratura 29

5. CONFRONTO CON I PIÙ COMUNI METODI DI BONIFICA 30

5.1. Trattamenti chimici 30

5.2. Trattamenti fisici 31

5.3. Pro e contro della phytoremediation 33

6. AREA AD ELEVATO RISCHIO DI CRISI AMBIENTALE DI "SIRACUSA" 37

6.1. Descrizione dell'area 37

6.2. Insediamenti produttivi 39

6.3. Stato dell'ambiente 42
6.3.1. Inquinamento atmosferico 42
6.3.2. Inquinamento idrico e del suolo 44
6.3.3. Rischi sanitari 45
7. SPECIE UTILIZZABILI IN SICILIA 49
7.1. Arundo donax L. 50
7.2. Brassica spp. L. 53
7.3. Cannabis sativa L. 58
7.4. Chrysopogon zizanioides L. 64
7.5. Cynara cardunculus spp. L. 67
7.6. Festuca arundinacea S. 72
7.7. Helianthus annuus L. 75
7.8. Ricinus communis L. 79
7.9. Altre specie 83
8. UTILIZZI DELLA BIOMASSA CONTAMINATA 90
8.1. Bioraffinerie 91
8.1.1. Lignina, cellulosa ed emicellulosa 93
8.1.2. Oleoresine e gomme 94
8.1.3. Coloranti 95
8.1.4. Amido e zuccheri 96
8.2. Produzione di biocombustibili 97
8.2.1. Biodiesel 97
8.2.2. Biogas 98
8.2.3. Bioetanolo 99
8.3. Produzione di energia 99
8.3.1. Gassificazione 100
8.3.2. Pirolisi 100
8.3.3. Combustione 101
8.3.4. Digestione aerobica 101
8.3.5. Sistemi d'abbattimento delle emissioni 102
9. ASPETTI LEGISLATIVI 106

9.1. Normativa europea 106
9.2. Normativa nazionale 107
10. CONCLUSIONI 110
BIBLIOGRAFIA 112

« Sei stato mai ad Augusta, tu, Corbera?» Vi ero stato tre mesi da recluta, durante le ore di libera uscita in due o tre si prendeva una barca e si andava in giro nelle acque trasparenti dei golfi. Dopo la mia risposta tacque; poi, con voce irritata: *«E in quel golfettino interno, più in su di punta Izzo, dietro la collina che sovrasta le saline, voi cappelloni siete mai andati?»*

«Certo, è il più bel posto della Sicilia, per fortuna non ancora scoperto dai dopolavoristi. La costa è selvaggia, è vero, senatore? Completamente deserta, non si vede neppure una casa; il mare è del colore dei pavoni; e proprio di fronte, al di là di queste onde cangianti, sale l'Etna; da nessun altro posto è bello come da lì, calmo, possente, davvero divino. È uno di quei luoghi nei quali si vede un aspetto eterno di quell'isola che tanto scioccamente ha volto le spalle alla sua vocazione che era quella di servir da pascolo per gli armenti del sole. »

(Giuseppe Tomasi di Lampedusa, *La sirena* da *I racconti*, ed. Feltrinelli)

1. INTRODUZIONE

La motivazione della scelta dell'argomento di questa tesi nasce dalla constatazione del forte degrado ambientale in cui versano diversi comuni della provincia di Siracusa, tra cui quello di Augusta in cui vivo. Tale degrado è causato dalla forte antropizzazione di questa area e dalla scelleratezza con cui si è proceduto ad una "selvaggia" industrializzazione, senza alcun piano regolatore e in assenza di sistemi adeguati di controllo, monitoraggio e depurazione che avrebbero consentito la tutela dei delicati equilibri ambientali.

Nel giro di un cinquantennio questo territorio, che rappresentava una delle aree di maggiore valenza storica e culturale della Sicilia orientale, è stato profondamente modificato e l'aria, l'acqua e la terra, nonché le persone che qui vi abitano, sono state avvelenate dalla costante e incontrollata attività industriale: dai fumi emessi ininterrottamente dalle innumerevoli ciminiere, dagli sversamenti in mare e nei corsi d'acqua che attraversano il polo industriale, dalle discariche abusive, dai malfunzionamenti e dalle perdite degli impianti.

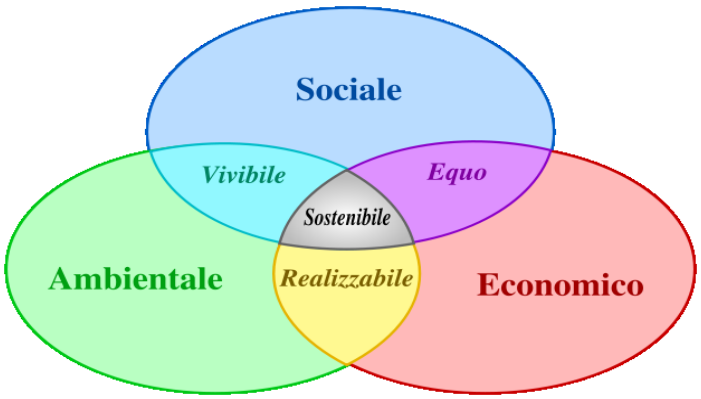
Con riferimento ai rischi sanitari, una delle denunce più inquietanti arriva dal dott. Giacinto Franco, già primario di pediatria dell'ospedale augusteo: *«nell'ultimo ventennio sono nati oltre 20 bambini l'anno con malformazioni e l'incidenza di modificazioni genetiche sulla popolazione esposta all'inquinamento chimico è pari al 5,6% contro il 2% della soglia massima indicata dall'O.M.S.».*

Al fine di trovare un rimedio significativo al grave stato di contaminazione dei suoli, propongo la tecnica della **"phytoremediation"** come una valida e, sotto ogni punto di vista, sostenibile alternativa ai comuni metodi di bonifica, di gran lunga più impattanti e costosi.

La phytoremediation si basa sui naturali processi fisiologici di alcune piante capaci di degradare o accumulare nei loro tessuti quantità di inquinanti molto più elevati rispetto al normale limite di tolleranza, permettendo, laddove possibile, di risanare in

maniera “pulita” questi territori senza modificarne ulteriormente gli equilibri e restituendoli al loro uso originario.

Questa tecnica rispetta i quattro pilastri fondamentali dello **sviluppo sostenibile**, ossia quello “*sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere le possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni*” (*Rapporto Brundtland, WCED, 1987. Commissione Mondiale per l’Ambiente e lo Sviluppo*), concetto che racchiude in sé i principi della *sostenibilità economica,* intesa come capacità di generare reddito e lavoro per il sostentamento della popolazione, della *sostenibilità sociale,* intesa come capacità di garantire condizioni di benessere, sicurezza e salute, equamente distribuite per classi e genere, della *sostenibilità ambientale,* intesa come capacità di mantenere la qualità e la riproducibilità delle risorse naturali ed, infine, della *sostenibilità istituzionale,* intesa come capacità di assicurare condizioni di stabilità, democrazia, partecipazione e giustizia.



Un corretto modello di sviluppo sostenibile sottintende la volontà di porre l'ambiente come cardine dello sviluppo economico, sociale e culturale delle comunità locali, compatibilmente all’esigenza di preservare un soddisfacente livello di conservazione delle risorse naturali.

Gli ultimi decenni sono stati sempre più caratterizzati dai temi della tutela delle risorse ambientali e contestualmente dalla possibilità di creare, con l’utilizzo sapiente delle stesse, nuove occasioni di sviluppo e crescita economico-sociale per le popolazioni.

Il lavoro di questa tesi è stato articolato in tre fasi: nella prima lo studio ha riguardato la letteratura scientifica nazionale ed internazionale sulle diverse tecniche di phytoremediation, sui fattori agronomici che ne influenzano l'efficacia e sul confronto con i più comuni metodi di bonifica.

Nella seconda fase, dopo aver descritto **l'Area ad Elevato Rischio di Crisi Ambientale (AERCA) di Siracusa** ed il relativo "stato dell'ambiente" con particolare riferimento ai livelli di inquinamento ed ai rischi sanitari che ne derivano, lo studio ha riguardato l'individuazione, tra le numerose piante con capacità di degradazione e bioaccumulo dei contaminanti, delle specie che più si adattano alle condizioni pedoclimatiche dell'area in esame ed in particolare di quelle che, potendo essere coltivate con input limitati, riescono a produrre una rilevante quantità di biomassa.

Di fronte alla problematica relativa allo smaltimento della biomassa contaminata, nell'ultima parte della trattazione, propongo come soluzione, in linea con i principi della sostenibilità dell'intervento e della riconversione ecologica del polo industriale, l'attivazione di una filiera agroindustriale innovativa, la **"bioraffineria"**, una nuova concezione di industria volta ad un utilizzo pressoché integrale della biomassa da cui ottenere una vastissima gamma di prodotti "no-food" biodegradabili quali gomme, adesivi, lacche, plastiche, coloranti, tessuti, pesticidi, carta, materiali da costruzione e, infine, dall'utilizzo della biomassa residua dai processi di trasformazione, biocombustibili in sostituzione ai carburanti di origine fossile, per il fabbisogno energetico dell'impianto o da cedere a terzi.

La phytoremediation, associata a tecniche colturali sostenibili e alla realizzazione di bioraffinerie nell'area industriale di Siracusa, può rappresentare una valida soluzione ai problemi della contaminazione dei suoli ed una concreta opportunità per la rivitalizzazione del settore agricolo e la conversione di quello industriale, oggi entrambi in crisi, creando nuove e diversificate possibilità occupazionali e di reddito e, nel contempo, migliorando la vita delle generazioni future indicando una via da seguire per il ripristino del corretto assetto ambientale del territorio in cui vivo e di tutti quelli che versano nelle stesse condizioni.

2. LA PHYTOREMEDIATION

La phytoremediation comprende una serie di tecnologie che sfruttano le capacità di determinate specie vegetali al fine di estrarre, accumulare, degradare o stabilizzare i contaminanti come metalli pesanti, composti organici ed elementi radioattivi, presenti nel suolo e nelle acque sotterranee.

Questa tecnica relativamente recente, nata all'inizio degli anni '90 e ad oggi in fase di sperimentazione e sempre più di affermazione, è dovuta ai naturali meccanismi di alcune specie vegetali di tollerare e accumulare nei loro tessuti, concentrazioni di contaminanti molto superiori rispetto al normale limite di tolleranza.

Tale straordinaria capacità non è altro che il risultato dell'evoluzione adattiva delle piante, agli ambienti ostili, attraverso numerose generazioni.

Le applicazioni di questa tecnica dunque, si inseriscono perfettamente in un'ottica di sostenibilità ambientale, andando in contro alle sempre più attuali e necessarie esigenze di salvaguardia dell'ambiente e della biodiversità.

L'interesse per la phytoremediation si è infatti sviluppato rapidamente poiché si tratta di una tecnologia a ridotto impatto ambientale ed economica, che permette la bonifica di suoli altrimenti sottratti all'agricoltura, valorizzando essi stessi e il territorio circostante e soprattutto abbattendo in maniera significativa le emissioni, altrimenti prodotte con altri sistemi di bonifica. In seguito sarebbe possibile creare una filiera che partendo dalla bonifica dei suoli, e utilizzando le piante che si sono prestate a tale scopo, arrivi alla produzione di energia pulita e numerosissimi derivati analoghi ai derivati del petrolio ma eco-compatibili, creando nuove e numerose opportunità di lavoro.

I contaminanti influenzati da tale processo sono numerosi e innumerevoli attività quotidiane ne sono la causa: industrie, centrali termoelettriche, inceneritori, traffico motorizzato, attività agricole, rifiuti domestici e tante altre, tutte attività importanti e difficilmente sostituibili.

I contaminanti in questione comprendono: metalli pesanti (Cd, Cr, Pb, Co, Ni, Se, Zn, Ag, Hg, As), radionuclidi (Cs, U, Sr), solventi clorurati, idrocarburi, pesticidi clorurati, insetticidi organofosfati, erbicidi, esplosivi (TNT,DNT, TNB, RDX, HMX), sostanze emulsionanti, policlorobifenili e composti organici.

La bonifica dei suoli contaminati soprattutto da metalli pesanti, è di prioritaria importanza poiché, essi non alterandosi nel tempo, permangono nell'ambiente praticamente per tempi indefiniti correndo l'ulteriore e ben più grave rischio di entrare nella catena alimentare, come spesso accade; ampliando un problema già di elevate proporzioni.

2.1. Iperaccumulo

Il processo attraverso il quale sostanze tossiche persistenti in generale, si accumulano all'interno di un organismo animale o vegetale, in concentrazioni superiori a quelle riscontrate nell'ambiente circostante prende il nome di "bioaccumulo"; quando le sostanze tossiche sono metalli pesanti si parla più precisamente di iperaccumulo.

Alcuni metalli anche se in quantità modeste, sono definiti essenziali per la vita delle piante ad esempio Cu, Fe, Mn, Ni, e Zn.

Tuttavia, la tendenza dei metalli a formare complessi all'interno della pianta, fa si che già a basse concentrazioni possano provocare effetti tossici, alterando le funzionalità enzimatiche di molte proteine.

Per ogni specie vegetale e metallo è possibile individuare la concentrazione adeguata per massimizzare la crescita od evitare condizioni di carenza;

é oltremodo appurato che concentrazioni superiori a quelle ottimali possono provocare inibizione della crescita o addirittura la morte della pianta.

Strettamente legato alla phytoremediation, e di particolare interesse ai fini di tale tecnica, è proprio la capacità di "Iperaccumulo" dei metalli pesanti di alcune specie vegetali.

Una pianta viene infatti definita *iperaccumulatrice* quando è in grado di accumulare una quantità di un certo metallo molto maggiori rispetto a quelle mediamente accumulate.

Questo concetto si riferisce ad una quantità minima superiore a: 100 mg/kg di S.S. per il Cd; 1000 mg/kg di S.S. per il Co, Cr, Cu, Ni e Pb; e 10.000 mg/kg di S.S. per il Mn e Zn (Baker et all. 2000).

Tabella 1 - Contenuti (µg/g di peso secco) normali e anomali di elementi in foglie di piante (da Reeves *et al.*, 1995)

Elemento	*Basso*	*Normale*	*Alto*	*Iperaccumulo*
Fe	10 - 60	600	2500	10000 – 35000
Mn	5 - 20	400	2000	10000 – 50000
Zn	5 - 20	400	2000	10000 – 50000
Cd	0,03 - 0,1	3	10	100 – 3000
Pb	0,01 - 0,1	5	100	1000 – 11400
Ni	0,20 - 1,0	10	50	1000 – 40000
Co	0,05 - 0,2	5	50	1000 – 10000
Cr	0,05 - 0,2	5	100	1000 – 7700
Cu	1 - 5	25	100	1000 – 12500
Se	0,01 - 0,1	1	10	100 – 6000

Questo tipo di piante sono infatti in grado di crescere su suoli metalliferi o da questi inquinati, senza mostrare alcun sintomo di fitotossicità.

Tale adattamento eco-fisiologico, sebbene non sia ancora stato pienamente chiarito, si ipotizza che agisca come un mezzo di difesa contro gli agenti patogeni delle piante (Boyd et al., 1994), e ne prevenga la predazione. In relazione a tali requisiti, tutte le specie iperaccumulatrici, che sono circa 400 tra alberi, colture, specie erbacee e cespugli, sono accomunate da uno o più dei seguenti difetti: lento e ridotto sviluppo della biomassa, derivante dalla spesa energetica necessaria per sostenere i processi fisiologici che le proteggono dai metalli in eccesso, e apparato radicale poco sviluppato.

2.2. Specie indicate per la phytoremediation

La predisposizione ad accumulare contaminanti organici e metalli pesanti in quantità piuttosto elevate (iperaccumulo) è ampiamente distribuita in tutto il regno vegetale. A tal fine sono state individuate ben 45 famiglie botaniche di piante iperaccumulatrici per un totale, fino ad oggi, di circa 400 specie.

Tali piante appartengono per la maggior parte alle famiglie delle: *Caryophyllaceae, Cyperaceae, Poaceae, Fabaceae, Chenopodiaceae, Asteraceae*, ma soprattutto le *Brassicaceae* i cui generi più rappresentativi sono: *Brassica*, *Thlaspi* e *Alyssum,* di cui di seguito ne sono riportate alcune specie tra quelle maggiormente riscontrabili in letteratura*,* e diverse altre specie appartenenti ai vari generi e molto promettenti per questo tipo di interventi.

Nello specifico tra i maggiori iperaccumulatori del **Pb** vi sono: *Armenia maritima halleri, Thlaspi rutundifolium* (fino a 8200mg/kg di s.s.), *Thlaspi alpestre, Alyssum wulfenianum e Alyssum Bertolonii* (Yoon et al., 2006), e *Brassica juncea* mostra delle ottime capacità di accumulo anche per Cd, Zn, Cu.

Per il **Cd** troviamo soprattutto *Arabidopsis halleri* e *Thlaspi caeraluscens* (anche Zn, Pb e Ni), entrambe brassicaceae, sono considerati un modello di studio per la phytoremediation; la prima accumula Cd e Zn soprattutto nelle cellule dell'epidermide radicale, mentre la seconda è in grado di traslocare velocemente i

metalli attraverso l'apparato xilematico (Baker et al). Per lo **Zn**, un elemento in tracce essenziale per le piante, ma tossico ad elevate concentrazioni; vi sono *Armenia halleri* e diverse specie del genere *Thlaspi* (Baker and Brooks 2002).

Sono state individuate, grazie a delle sperimentazioni effettuate sia in Tailandia che in un sito contaminato della laguna di Venezia, alcune specie tra le felci, in particolar modo *Pteris Vittata* con un tasso di accumulo dell'As nelle foglie pari a 2580 mg/kg di s.s. (Fitz et al., 2003). Tuttavia la maggior parte delle specie sopracitate, soprattutto quelle appartenenti ai generi Thlaspi e Alyssum, pur avendo delle buone capacità di tolleranza e accumulo, non possono essere applicate convenientemente in interventi di phytoremediation a causa della scarsa produzione di biomassa o per una maggiore richiesta di input.

Altre specie erbacee appartenenti alle varie famiglie botaniche, di cui sono note le capacità di fitoestrazione sono:

Cynodon dactylon (gramigna comune), iperaccumulatrice di Cd, Zn, Cu (Shu et al., 2004) ampiamente diffusa in tutto il territorio nazionale e mondiale, tra l'altro anch'essa oggetto di sperimentazione in un sito nella laguna di Venezia, inquinato a seguito di attività minerarie assieme ad altre specie quali *Rumex crispus*, *Silene alba, Conyza canadensis*; la *Scropularia canina* specie erbacea, autoctona negli ambienti mediterranei con capacità di estrazione soprattutto per il Pb (A. Cao, A.Carucci et al., Campo Pisano Sardegna 201), *Festuca arundinacea* certamente fra le graminacee più produttive, con un apparato radicale profondo e ramificato e anche fra le più longeve, *Mirabilis jalapa* (bella di notte), *Arundo donax* (canna comune o domestica), *Ricinus communis* (ricino), *Agrostis tenuis* (capillaris), *Medicago sativa* (erba medica), *Heliantus annuus* (girasole), *Cannabis sativa* (Zn, Cd, Pb, Cr, Hg), *Silibum marianum*, *Cynara cardunculus, Miscanthus ssp.* e *Sorghum bicolor* che accumula 119 mg/kg di S.S. di Pb, quantità triplicata con l'aggiunta di chelante (A. Carucci, T. Lai, A. Cao 2012). Gli studi sulla phytoremediation hanno inoltre permesso di individuare varie specie arboree interessanti ai fini di tali interventi.

Le caratteristiche che rendono favorevole la loro applicazione riguardano soprattutto: l'elevata produzione di biomassa, certamente superiore a quella prodotta dalle specie

erbacee, l'elevata capacità di tolleranza e resistenza a diverse condizioni di inquinamento, data la loro longevità la possibilità di effettuare interventi a lungo termine, ma principalmente uno sviluppo maggiore e più profondo dell'apparato radicale permettendo l'esplorazione di porzioni di suolo altrimenti non raggiungibili dalle radici delle colture erbacee.

Per contro l'utilizzo degli alberi può essere limitato da vari fattori quali: una più lenta crescita soprattutto nelle prime fasi, una più onerosa gestione della coltura e della biomassa prodotta in termini di lavorazioni e denaro, e soprattutto la loro prolungata permanenza in campo aumenta il rischio di ingresso nella catena alimentare delle sostanze nocive accumulate.

Le piante in questione comprendono varie specie appartenenti ai generi *Salix, Populus e Quercus* (con valori di accumulo a seconda della specie fino a 8000 ppm/kg di S.S. per lo Zn, e valori superiori a 100 ppm/kg di S.S. per Cd e Pb). In particolare vi sono: *S. alba*, *S. dasyclados* e *S. nigra* (soprattutto Cd e Zn, e valori inferiori di Ni, Pb e As), *P. alba, P. nigra, P. tremula* e *P. canescens* (Zn, Pb, Cd, Cu) e *Q. nigra, Q. virginiana, Q. bicolor* e *Q. camadulensis*. Particolarmente diffusa è la capacità di queste specie di degradare erbicidi e fitofarmaci. Sono inoltre riscontrabili in letteratura diverse specie del genere *Eucalyptus, Paulowa tomentosa, e Acacia saligna* con una specificità per Cd e Pb (i valori di accumulo per quest'ultimo nell'Acacia variano da 20 ppm/kg di S.S. nelle radici e valori decisamente più elevati per le foglie fino a 1.350 ppm).

Certamente la specie "perfetta" ai fini di tale tecniche non esiste, ma un forte impulso può pervenire grazie all'ausilio dell'ingegneria genetica.

Vari studi genetici infatti, stanno esaminando l'efficienza della fitoestrazione nel caso in cui vengano trasferiti i geni responsabili dell'iperaccumulo, in specie caratterizzate da una maggiore produzione di biomassa; è il caso di Martinez et al., 2005.

La specie *Nicotiana glauca*, caratterizzata da un'elevata produzione di biomassa, notevole profondità delle radici e facilità di propagazione, è stata trasformata con il

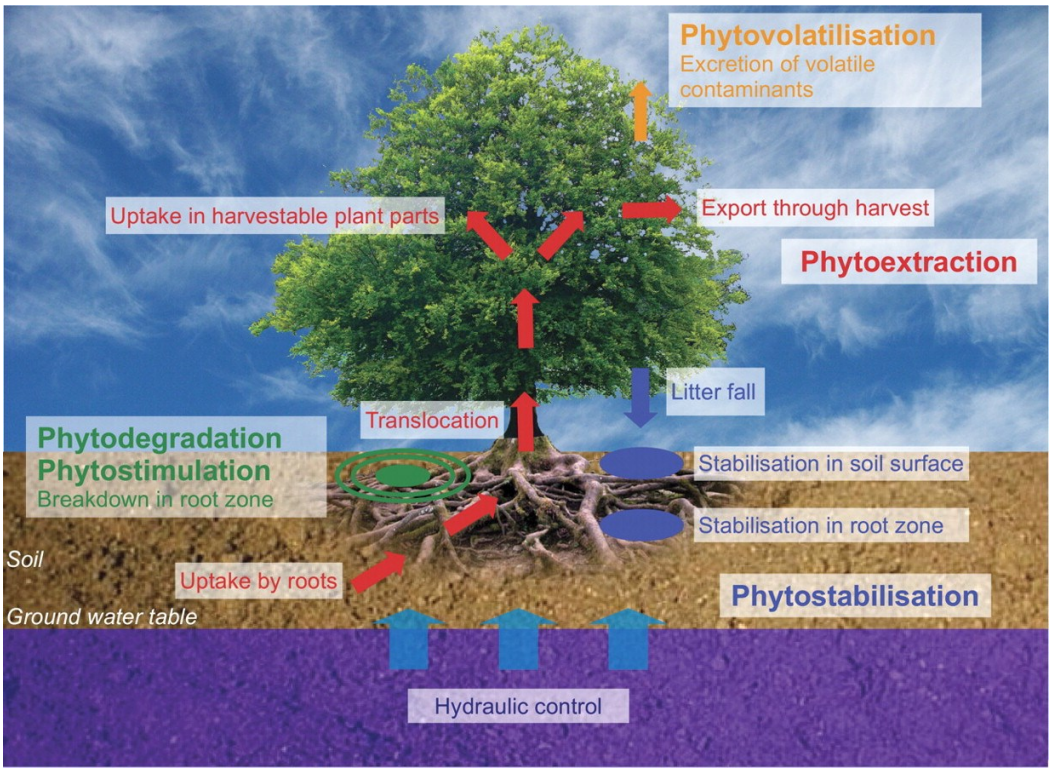
gene TaPCS1 appartenente alla specie *Thlaspi caerulescens,* di cui sono note le capacità di iperaccumulo.

I risultati hanno evidenziato un maggior accumulo dei metalli pesanti e del Boro, e una rendita di biomassa 100 volte maggiore nella pianta geneticamente modificata; inoltre Thlaspi caerulescens si è dimostrata incapace di sopravvivere in suoli altamente contaminati da Pb e Zn (concentrazioni > 11.000 mg/kg di Pb e > 4.500 mg/kg per lo Zn) a differenza della Nicotiana modificata.

È possibile dunque prevedere che buoni risultati potranno venire dal lavoro di miglioramento genetico.

3. TECNICHE DI PHYTOREMEDIATION

La Phytoremediation, detta anche Botanoremediation o Agroremediation, a seconda del meccanismo di depurazione coinvolto, può essere distinta in Fitoestrazione, Fitostabilizzazione, Rizodegradazione, Fitodegradazione o Fitotrasformazione, Fitovolatilizzazione e Rizofiltrazione.



Le varie tecniche di Phytoremediation si possono suddividere a loro volta in due categorie: "in-situ" e "ex-situ":

Gli interventi *in-situ* permettono di decontaminare le aree interessate in loco, cioè senza rimuovere il suolo o le acque da bonificare, di conseguenza tale metodo è di gran lunga preferito al secondo sia da un punto di vista ambientale, che agronomico ed economico.

Si ricorre agli interventi *ex-situ* solo quando i primi non sono in grado di garantire livelli di degradazione sufficienti, o quando, a causa delle particolari caratteristiche della matrice contaminata o dell'elevata concentrazione degli inquinanti, diviene necessaria l'escavazione del terreno e il suo successivo trattamento anche a notevole distanza dal luogo dell'intervento; ciò richiede sicuramente dei costi ed un impatto ambientale di gran lunga più elevato legati alle numerose operazioni di rimozione e trasporto.

3.1. Fitoestrazione

La fitoestrazione è il meccanismo mediante il quale le piante assorbono il contaminante tramite l'apparato radicale e lo trasferiscono al proprio interno accumulandolo in zone variabili da pianta a pianta (germogli, foglie, fusto, radici) e da sostanza a sostanza.

I meccanismi coinvolti in questo processo sono diversi:

- la compartimentalizzazione, ossia la segregazione di tali sostanze in appositi comparti cellulari, i vacuoli, che le separano dalle vie metaboliche;
- la chelazione che consente di legare i metalli in maniera irreversibile a molecole organiche (es. fitochelatine, acido citrico) o alle proteine presenti sulle cellule della superficie radicale;
- la biotrasformazione che riduce i metalli in forme ioniche biologicamente meno attive e quindi meno tossiche.

La fitoestrazione si può inoltre suddividere in due categorie; quella continua e quella assistita (Salt et all., 1998).

Nella prima le specie iperaccumulatrici, accumulano ed assimilano i metalli pesanti in elevate quantità, ad un ritmo costante durante l'intero ciclo fino alla raccolta, (Zerbi e Marchiol, 2004) seppur producendo poca biomassa; mentre quella assistita o indotta, consiste nell'utilizzo di specie ad alta produzione di biomassa, coadiuvate da una serie di pratiche atte a stimolare un intenso accumulo di metalli nei tessuti; tra queste l'utilizzo di sostanze chelanti da distribuire sul terreno, è in grado di

aumentare la solubilità dei metalli pesanti ed il loro assorbimento da parte delle piante (Zerbi e Marchiol, 2004). Non appena la pianta mostra evidenti sintomi di tossicità viene raccolta e smaltita.

Bisogna però osservare che nella fitoestrazione assistita, i sintomi di fitotossicità per la pianta spesso sembrano essere associati, più che al metallo, all'eccesso di chelante che probabilmente modifica gli equilibri tra macro e micro nutrienti.

Alcune delle specie vegetali maggiormente interessate dai processi di fitoestrazione sono: *Brassica Juncea, Thlapsi caerulescens, Helianthus annuus , Alyssum ssp.* (E.P.A., 2000).

3.2. Fitostabilizzazione

La fitostabilizzazione consente invece la stabilizzazione dei contaminanti, tramite la loro immobilizzazione nella rizosfera, la porzione di suolo a contatto con le radici, riducendone così la mobilità e quindi anche la migrazione negli acquiferi sotterranei e la biodisponibilità.

Questo meccanismo è dovuto alle azioni di: assorbimento e accumulo all'interno delle radici, adsorbimento sulla superficie radicale, e precipitazione e stabilizzazione soprattutto grazie alla produzione, da parte delle radici, di essudati (composti da proteine, zuccheri, aminoacidi) nell'interfaccia radice-suolo.

- *Fitostabilizzazione nella rizosfera:* le piante rilasciano nella rizosfera essudati, che determinano la precipitazione o l'immobilizzazione dei contaminanti nel suolo; in questo modo viene ridotta la frazione di inquinante biodisponibile e la possibilità che percoli nelle falde sotterranee.

Inoltre la presenza nella rizosfera di ectomicorrizie in particolare, può incrementare l'immobilizzazione dei contaminanti ed avere contemporaneamente effetti benefici sulla nutrizione delle piante (Tsao 2003).

- *Fitostabilizzazione sulle membrane radicali:* in questo caso le proteine e gli enzimi associati alle pareti delle cellule delle radici, sono in grado di legare il contaminante

sulla superficie esterna delle membrane radicali, non permettendone così l'ingresso all'interno della pianta.

- *Fitostabilizzazione nelle cellule radicali:* allo stesso modo le proteine e gli enzimi della parete cellulare possono consentire il trasporto dei contaminanti attraverso le membrane radicali; una volta assorbiti possono essere trattenuti all'interno dei vacuoli delle cellule radicali.

Per l'applicazione di questa tecnica sono preferibili specie arboree, come pioppi e salici che possiedono un apparato radicale sviluppato e profondo, o specie erbacee con radici molto fitte e fibrose come *Agrostis tenuis, Helianthus annuus, Chrysopogon zizanioides,* e diverse specie del genere *Festuca.*

La fitostabilizzazione però, non rappresenta una vera e propria tecnica di bonifica poiché non implica processi di accumulo o degradazione; rimane comunque una valida alternativa quando le concentrazioni di inquinanti sono troppo elevate per poter applicare la fitodegradazione o fitoestrazione, e risulta necessario evitare che il contaminante migri nelle falde sotterranee o si disperda nell'ambiente.

3.3. Rizodegradazione

La Rizodegradazione invece consiste nella degradazione dei contaminanti presenti nel suolo grazie all'effetto della simbiosi che si instaura tra la pianta e i numerosissimi microorganismi (batteri, funghi, lieviti) presenti nella rizosfera.

Le piante attraverso l'apparato radicale producono degli essudati (zuccheri, aminoacidi, sostanze proteiche), che stimolano la proliferazione dei microorganismi normalmente presenti nel suolo, questi metabolizzano e degradano i composti organici, riducendoli in composti innocui e fonte di nutrimento per la pianta stessa.

I composti nocivi interessati da tale meccanismo sono, oltre alle sostanze organiche, soprattutto pesticidi e solventi clorurati.

Numerosi esperimenti hanno dimostrato che la biodegradazione è fortemente influenzata dalla presenza di piante nel terreno, infatti in tali siti, la degradazione dei fitofarmaci ed altre sostanze organiche è sensibilmente maggiore rispetto ai suoli

privi di copertura vegetale; ciò a dimostrazione del fatto che nella rizodegradazione la cooperazione tra pianta e microorganismo è fondamentale.

In alcune applicazioni sono state utilizzate con successo *Morus rubra, Malus fusca*, *Maculara pomifera ed Helianthus annuus* (E.P.A. 2000).

3.4. Fitodegradazione

La fitodegradazione o fitotrasformazione consiste nell'assorbimento diretto dei contaminanti dal suolo, che vengono accumulati nei tessuti della pianta e nella loro successiva degradazione.

Il contaminate una volta assorbito infatti, viene degradato attraverso i naturali processi di metabolizzazione: le molecole organiche complesse vengono ridotte in molecole organiche semplici ed incorporate nei tessuti vegetali favorendone la crescita, lo stesso destino vale per i cataboliti non tossici prodotti durante la degradazione.

Diversi sono gli enzimi che entrano in gioco in tale processo; la *dealogenasi* , che rimuove gli alogeni presenti nei composti organici, l'*ossigenasi,* che permette l'ossidazione di composti come gli idrocarburi alifatici, e la *nitroriduttasi* che riduce composti contenenti azoto, come il tritolo.

I prodotti derivati dal processo di fitodegradazione seguono quindi due diversi destini; possono essere immagazzinati, attraverso i processi interni di lignificazione, oppure possono essere mineralizzati ad anidride carbonica ed acqua.

Tale tecnica trova applicazione per molti contaminanti organici quali solventi clorurati (TCE), erbicidi (atrazina, alachlor), esplosivi, composti aromatici e nutrienti inorganici (Schnoor 1998).

Diverse ricerche ed impianti pilota hanno dimostrato l'efficienza di tale trattamento in terreni contaminati da rifiuti derivanti da munizioni, per merito del già citato enzima nitroriduttasi, si è passati da concentrazioni di 4000 mg/kg di tritolo a meno di 2 mg/kg.

Altri esempi di fitoestrazione riguardano l'Arsenico, utilizzando specie vegetali quali *Helianthus Hannus* e *Pteris Vittata,* Cadmio e Zinco tramite *Thlaspi caerulescens,* Piombo tramite *Brassica juncea,* il Cesio-^{137} e lo Stronzio-^{90} tramite *Helianthus Hannuus* (girasole) e numerose specie arboree quali *Salix nigra*, *Betula nigra*, e diverse specie di *Quercus* hanno mostrato buone capacità di degradare vari erbicidi (Suthan Suthersan 2003).

3.5. Fitovolatilizzazione

La fitovolatilizzazione è un'ulteriore applicazione della phytoremediation; è un processo solitamente associato alla fitodegradazione, infatti esso prevede l'assorbimento del contaminante dalla soluzione circolante del suolo, che può essere degradato sia nella rizosfera, prima del suo assorbimento, che dopo, all'interno della pianta.

Una volta nella pianta il contaminate viene traslocato nelle foglie e da qui tramite gli stomi rilasciato nell'atmosfera attraverso il meccanismo della traspirazione.

Questa tecnica si applica soprattutto ai contaminanti organici volatili (TCE, MBTE) ed inorganici come benzene, solventi clorurati, As, Hg, Se (E.P.A. 2000).

Diversi studi sono stati fatti sull'utilizzo dei pioppi per l'assorbimento e la fitovolatilizzazione del (TCE) tricoetilene (Chappell 1998), o di acque contenenti MBTE (Rubin et all., 2001); e varie specie vegetali come *Arabidopsis thaliana* e *Brassica Juncea* sono state utilizzate con successo.

Tale processo, però, non sempre rappresenta una valida alternativa in quanto il contaminante dal suolo viene traslocato nell'atmosfera, spostando il problema da un comparto ambientale ad un altro.

3.6. Rizofiltrazione

La rizofiltrazione infine, consiste nei processi di assorbimento e adsorbimento radicale del contaminante presente in forma disciolta nelle acque sotterranee. Questo

processo di conseguenza non viene applicato per la bonifica dei suoli, anche se potrebbe essere utilizzato in presenza di terreni acquitrinosi o stagnanti, bensì per il trattamento di acque di falda contaminate grazie all'apparato radicale delle piante.

La tecnica utilizza essenzialmente delle "strisce vegetate" (vegetation strips, bio-curtains, bio-filters), che fungono da barriere idrauliche nei confronti dei contaminanti disciolti nelle acque favorendone la loro precipitazione.

Le colture che si prestano a tale tecnica infatti sono spesso impiegate per trattamenti *ex-situ*, dove l'acqua inquinata viene trasferita in sistemi artificiali detti idroponici, e le piante ivi crescono con le radici praticamente immerse e una volta sature degli agenti inquinanti vengono raccolte, essiccate ed inviate al processo finale.

Anche in questo caso diverse sperimentazioni, soprattutto in serra, hanno dimostrato l'efficacia di tale meccanismo per accumulare soprattutto vari metalli pesanti (Pb, Cd, Zn, Cr, Cu) e radionuclidi come Uranio^{234} e Cesio^{137} .

Alcuni ricercatori della Phytotec, in U.S.A., hanno condotto dapprima esperimenti su piccola scala utilizzando piante di girasole, (*Helianthus annuus*) per il trattamento di acque sotterranee e di processo contaminate da uranio con ottimi risultati, poi i girasoli sono stati utilizzati con successo dalla stessa Phytotec, anche a Chernobyl, in un piccolo stagno nei pressi del reattore che esplose nel drammatico incidente del 26 aprile 1986; anche in questa occasione si è riusciti a rimuovere il Cesio e lo Stronzio in esso contenuti (Prasad, 2007).

Un'altra specie ritenuta particolarmente indicata per le capacità di rizofiltrazione è *Brassica juncea.*

4. FATTORI CHE INFLUENZANO LA PHYTOREMEDIATION

Le fitotecnologie sono state studiate, finora, soprattutto su piccola scala; in laboratori o in piccoli impianti pilota, mentre sono scarsi i dati riguardanti applicazioni su scala reale, condizione che causa purtroppo la mancanza di dati standardizzati a cui fare riferimento.

Questo deriva anche dal fatto che ogni intervento di fitobonifica costituisce un caso a se stante, infatti il gran numero di variabili che intervengono in questo tipo di tecnologia la rendono sito-specifica.

Le variabili in questione, da considerare attentamente quando si intende realizzare un intervento di fitobonifica e da cui dipende la scelta della pianta, riguardano numerosi fattori biotici e abiotici, in particolar modo: il **tipo di contaminante** e la concomitanza tra essi; é molto frequente infatti, che i siti presentino contaminazioni di più metalli.

A tal riguardo la maggior parte degli studi riguardanti la fitoestrazione sono stati eseguiti con piante in matrici inquinate da un solo elemento, e sebbene esistano prove della capacità di alcune specie di tollerare la presenza contemporanea di diverse sostanze, non ci sono tuttavia risultati sperimentali che lo attestino con sicurezza; ciò significa che su un suolo multicontaminato bisognerebbe ricorrere ai cosiddetti *treatment trains,* cioè trattamenti integrati nei quali vengono coltivate specie diverse, contemporaneamente o in successione, in base alla loro specializzazione.

Sicuramente in queste situazioni si complica notevolmente la scelta delle specie nonché l'esito della bonifica.

Altro fattore che può influenzare la phytoremediation dipende dalla **concentrazione** delle sostanze, che se elevata riduce il potenziale d'assorbimento, pregiudicando la sopravvivenza delle piante e quindi la riuscita dell'intervento.

La **profondità** della contaminazione può renderne difficile o addirittura impossibile l'applicazione, paradossalmente è più facile e veloce bonificare aree estese dove

persiste una contaminazione superficiale, piuttosto che aree contenute ma con una contaminazione profonda, tale limite è ovviamente dovuto alla capacità di esplorazione da parte delle radici delle piante.

La **presenza di acqua**, la **composizione minerale del suolo** e soprattutto la **variazione del Ph** può inibire o favorire tale processo, infatti un abbassamento del pH del suolo favorisce la solubilità dei metalli pesanti che vengono così assorbiti dalle piante con maggiore facilità, tale caratteristica può però avere dei risvolti negativi in quanto grazie all'aumento della solubilità, queste sostanze possono percolare più facilmente e giungere nelle falde sotterranee.

Mentre i fattori da ricercare per la scelta della specie più adatta riguardano soprattutto: la capacità di tollerare, assorbire, traslocare e accumulare elevate concentrazioni di contaminanti, un'elevata produzione di biomassa e un rapido sviluppo dell'apparato radicale che deve essere soprattutto esteso e profondo in quanto la capacità di bonifica dipende essenzialmente dalla porzione di suolo esplorato dalle radici. I sistemi radicali di tipo fibroso, caratteristici di alcune specie erbacee (*Festuca spp, Chrysopogon z., Helianthus a.*), possiedono numerose radici sottili che offrono un'ampia superficie di contatto con il suolo.

Le specie arboree invece, permettono una maggiore estensione in profondità, con valori che possono superare i 20 m per gli alberi freatofitici. Bisogna tuttavia considerare che si tratta di valori massimi, raggiunti in condizioni ottimali e ben lontane da quelle riscontrabili nei siti da bonificare.

Generalmente la phytoremediation trova applicazione in presenza di apparati radicali che raggiungono i 30-60 cm di profondità per le specie erbacee e 3 m per quelle arboree.

Altri parametri importanti riguardano un'elevata produzione di biomassa, un alto tasso di crescita e quindi un ciclo breve per evitare una permanenza prolungata della pianta sul terreno che aumenta le possibilità di predazione da parte della fauna con conseguente ingresso dell'inquinante nella catena alimentare.

L'efficienza fitoestrattiva, infatti, è estremamente legata alla produzione di biomassa; a parità di accumulo, maggiore è la quantità di biomassa prodotta, maggiore sarà la

quantità di inquinanti asportati; in merito bisogna sottolineare però, che la buona parte delle specie bioaccumulatrici e iperaccumulatrici indicate per la phytoremediation, hanno un habitus vegetativo abbastanza limitato e quindi offrono una produzione di biomassa molto contenuta.

Generalmente la scelta della pianta ricade su specie autoctone, adatte quindi alle condizioni pedoclimatiche del sito in esame, e che cresciute spontaneamente in tali luoghi abbiano quindi sviluppato delle forme di tolleranza nei confronti dei contaminanti.

Sebbene questo sia l'orientamento da preferire, si verificano casi in cui la scelta ricade su specie esotiche poiché si dimostrano più efficaci nella bonifica di determinati inquinanti.

In tali casi è necessario che siano rispettate determinate condizioni, ossia che la pianta, specialmente se invasiva, non sia in grado di propagarsi allo stato selvatico compromettendo gli equilibri del nuovo habitat.

4.1. Pratiche agronomiche per ottimizzare il bioaccumulo

Al di là dell'aspetto prettamente tecnico e scientifico esistono una serie di pratiche agronomiche atte a migliorare il processo di bioaccumulo delle colture:

4.1.1. Scelta della coltura

La selezione della specie è sicuramente il fattore più importante che influenza il grado della bonifica.

La progettazione di un intervento di phytoremediation infatti, deve sempre partire dall'osservazione diretta del sito interessato, e in particolar modo nelle ricerca delle specie in esso presenti, che essendo li nate e cresciute, presentano sicuramente delle caratteristiche di tolleranza.

Le specie autoctone come già detto sono da preferire a quelle esotiche, in quanto queste ultime potrebbero risultare invasive ed interferire con l'equilibrio dell'ecosistema.

È fondamentale inoltre valutare il grado e la profondità della contaminazione per individuare la specie vegetale più appropriata.

Ad esempio per la decontaminazione dei suoli inquinati superficialmente la scelta dovrebbe ricadere su specie con un apparato radicale esteso superficialmente e ricco di capillari, tipico delle colture erbacee; mentre specie con apparati radicali più sviluppati, è il caso delle piante arboree, sono più indicate per le contaminazioni più profonde.

4.1.2. pH e concimazione

Il pH del suolo è un fattore imprescindibile sia per lo sviluppo fisiologico della pianta, che per la vita nel suolo in generale. La reazione del terreno condiziona in modo particolare la solubilità e, quindi, la disponibilità sia degli elementi nutritivi in forma direttamente assimilabile per le piante, sia dei metalli pesanti. Valori anomali del pH provocano fenomeni di precipitazione chimica che si riflettono sulla nutrizione minerale con fenomeni di carenza. Il pH inoltre influenza l'attività biologica di alcuni gruppi funzionali di microrganismi che intervengono direttamente nei cicli biochimici di alcuni elementi (in particolare azoto e zolfo). Infine, il pH ha riflessi più o meno rilevanti sulla struttura del terreno, influenzando i fattori che determinano lo stato di flocculazione dei colloidi.

Un suolo tendenzialmente acido sarebbe quindi favorevole per gli interventi di phytoremediation; è ormai riconosciuto che l'acidificazione del suolo derivante dall'impiego di solfato d'ammonio, utilizzato per le concimazioni, è in grado di favorire la mobilità e l'assimilazione del cadmio e dello zinco.

Tuttavia l'aumentata mobilità dei metalli può costituire un'arma a doppio taglio, aumentandone la capacità di percolazione e possibile contaminazione delle acque di falda.

Diverse ricerche indicano che dopo il processo di fitoestrazione effettuato in terreni con reazione acida; grazie all'attività delle piante e le azioni favorevoli esercitate dai microorganismi nella rizosfera, è possibile riprendere le attività agricole e il normale

sviluppo dell'ecosistema riportando eventualmente il pH ad un valore prossimo alla neutralità (Chaney et al., 2000).

Ciò è possibile trattando il terreno con della calce, come spesso si fa in ambito agronomico tramite la tecnica della calcitazione.

Tuttavia nelle applicazioni di phytoremediation questo appare più complicato rispetto alle condizioni di normalità; una prematura calcitazione può infatti aumentare la capacità del suolo di legare i metalli, riducendone la mobilità e quindi il potenziale di fitoestrazione.

Il fosforo, ad esempio, è un nutriente importantissimo e le piante rispondono positivamente a tali somministrazioni aumentando la biomassa prodotta e lo sviluppo dell'apparato radicale; tuttavia l'aggiunta di concimi fosfatici, può anche inibire l'assorbimento di alcuni importanti contaminanti come il piombo e altri metalli pesanti (Chaney et al., 2000).

Una possibile soluzione potrebbe essere nell'apporto di fosforo mediante applicazioni fogliari, in modo tale da garantire il nutriente alla pianta senza interferire sulla mobilità dei metalli.

4.1.3. Agenti chelanti

Un metodo per ottimizzare i risultati della fitoestrazione, è la solubilizzazione dei metalli mediante la somministrazione di agenti chelanti. La loro aggiunta nel terreno ne aumenta la bio-disponibilità e favorisce il lavoro dell'apparato radicale e dei suoi essudati nella rizosfera, di "catturare", accumulare ed adsorbire gli inquinanti (Lasat, 2000). I chelanti, aumentano la concentrazione di metalli disciolti, e si combinano al metallo formando complessi (chelati) in cui il metallo diventa parte di un anello.

Tra i chelanti più diffusi, si trovano EDDS (acido etilendiamminodisuccinico) ed EDTA (acido etilendiamminotetracetico). L'EDTA è largamente utilizzato per il suo basso costo e l'alta efficacia; questo aggiunto in concentrazioni dell'ordine di 10-20 $mmol/kg_{suolo\ secco}$ si è rivelato molto efficace per l'estrazione dal suolo di Pb, Cd, Cu, Ni, Zn trattati con colture di mais e senape indiana (*Brassica juncea*) (Blaylock et al.,

1997). L'EDDS è un composto più facilmente biodegradabile e crea meno percolazione rispetto all'EDTA.

Il rapporto chelante/metallo è molto importante in quanto rappresenta la quantità di chelante da somministrare: più alto è il rapporto, più la solubilizzazione è veloce e completa. Le quantità applicate sono solitamente 0,5-5 $g_{chelante}/kg_{suolo}$.

L'efficienza dell'estrazione dipende non solo dalla quantità di chelante, ma anche dal tipo di suolo, poiché altri ioni (quali Ca e Fe) interagiscono con il chelante e vengono co-solubilizzati: tale quantità dovrà quindi essere in eccesso rispetto a quella teoricamente necessaria per il metallo da estrarre.

Tra i possibili biochelanti sostitutivi, sono stati studiati l'acido citrico, ossalico e tartarico, che sono naturalmente essudati dalla pianta nel terreno, ma vengono degradati troppo velocemente rispetto a l'EDTA, infatti, sono necessarie quantità molto maggiori per avere effetti comunque meno significativi.

L'utilizzo degli agenti chelanti infine, comporta diverse controindicazioni: molti di questi, infatti, come ad esempio l'EDTA, non sono prontamente biodegradabili e quindi risultano persistenti nell'ambiente, altri fattori negativi sono la non selettività nell'estrarre i metalli, la parziale inibizione della crescita della pianta (anche se somministrato a piccole concentrazioni) e il significativo aumento della capacità di percolazione del complesso metallo-chelante; per questo motivo l'uso di tali sostanze deve essere limitato alle aree in cui è stato interrotto il collegamento con la falda, o in cui il complesso è mantenuto nella parte superficiale del terreno.

4.1.4. Semina

È ormai un concetto assodato che il grado di estrazione dei metalli dipende dalla quantità di biomassa vegetale prodotta, la quale a sua volta è sicuramente influenzata dalla densità di impianto (piante/m^2).

Tale densità influenza sia la resa/pianta sia la resa/ha. In linea generale una maggiore densità di semina tende a minimizzare la resa per pianta e a massimizzare la resa per ettaro.

Questo influenza i flussi di crescita e sviluppo delle piante; infatti ad un aumento della densità corrisponde inevitabilmente una maggiore competizione tra le piante sia per l'assorbimento dell'acqua e dei nutrienti, che per l'architettura dell'apparato radicale, con ovvie conseguenze negative sull'assorbimento dei metalli. Tuttavia una minore densità di semina determina un grado di copertura del suolo inferiore, con risvolti negativi sui processi di erosione del suolo e lisciviazione, e complessivamente una ridotta produzione di biomassa. È dunque necessaria un'accurata valutazione delle condizioni pedo-climatiche dell'area e delle caratteristiche della pianta al fine di individuare la corretta densità di semina che favorisca un'ottimale sviluppo della coltura senza compromettere le capacità di fitoestrazione.

4.1.5. Rotazione colturale

La rotazione colturale è un altro principio agronomico in grado di avere effetti positivi sulla fitoestrazione.

Tutte le colture infatti, dovrebbero essere ruotate per evitare l'impoverimento della fertilità del suolo e contrastare la proliferazione di erbe infestanti, predatori e malattie che incidono negativamente sulla resa.

Quando i tempi previsti per la bonifica sono brevi (inferiori ai 2-3 anni), la monocoltura può dare risultati significativi, ma essendo la maggior parte di questi progetti a lungo termine (> 5- 10 anni) è altamente improbabile ottenere una bonifica accettabile da una sola coltura ripetuta senza compromettere la fertilità del suolo.

L'obiettivo perseguibile dunque è quello di identificare all'interno delle specie interessanti ai fini della phytoremediation, rotazioni colturali specializzate per bonificare efficacemente i suoli contaminati garantendo nel contempo di preservare la fertilità del suolo.

Oltre la rotazione, un'altra pratica interessante potrebbe essere la consociazione tra colture erbacee e arboree, ossia la coltivazione contemporanea di entrambe le specie sullo stesso appezzamento, garantendo una contemporanea bonifica dello strato superficiale grazie alle prime, e una bonifica degli strati più profondi oltre che

prolungata nel tempo, grazie alle seconde; permettendo a entrambe le colture di beneficiare l'una dell'influenza dell'altra.

4.1.6. Diserbo e irrigazione

Anche il diserbo e l'irrigazione sono due pratiche agronomiche estremamente importanti.

Le erbe infestanti ostacolano l'affrancamento e l'emergenza delle giovani piantine oltre a sottrarre loro acqua e sostanze nutritive indispensabili. Queste possono essere controllate meccanicamente o chimicamente in pre-emergenza o post-emergenza, oppure attraverso accorgimenti di tipo agronomico, tra questi ad esempio, una maggiore densità di semina può garantire un più elevato grado di ombreggiamento del terreno sottostante la coltura, e sottrarre quindi luce alle infestanti.

Mentre è necessario garantire un adeguato tasso di umidità nel suolo, in quanto l'assorbimento dei metalli da parte delle radici dipende dal movimento degli stessi nella soluzione circolante.

Il volume d'acqua da erogare, deve essere certamente compatibile con le esigenze della coltura e compensare le perdite per evaporazione e traspirazione.

4.1.7. Aratura

L'aratura infine, oltre a garantire un certo controllo delle infestanti, favorire l'approfondimento delle radici nel terreno, creare delle riserve idriche importanti e interrare i concimi, può essere efficacemente impiegata per riportare negli strati più superficiali gli inquinanti eventualmente precipitati in profondità, favorendone quindi la captazione e l'estrazione.

5. CONFRONTO CON I PIÙ COMUNI METODI DI BONIFICA

Dal momento che si tratta ancora di una tecnica emergente è difficile trovare dati economici precisi riferiti alle singole fitotecnologie, poiché quelli disponibili in letteratura sono scarsi e spesso poco confrontabili, inoltre la maggior parte dei dati si riferisce a sperimentazioni pilota, che rischiano di non essere rappresentativi rispetto alle condizioni di campo.

Gli interventi effettuati per il recupero dei suoli contaminati sono anzitutto classificati in tre categorie:

- interventi ***in-situ****:* effettuati sul sito in esame, senza movimentazione o rimozione del suolo;
- interventi ***ex-situ on-site:*** con rimozione e movimentazione dei materiali e suolo inquinato, ma con trattamento nel sito stesso e possibile riutilizzo.
- interventi ***ex-situ off-site:*** con rimozione e movimentazione dei materiali e suolo inquinato fuori dal sito, per avviarli negli impianti di trattamento autorizzati o in discarica.

Gli interventi vengono inoltre classificati sulla base dei trattamenti cui viene sottoposta la matrice contaminata in: **chimici** (soil washing, flushing, estrazione con solventi), e **fisici** (solidificazione/stabilizzazione, vetrificazione, desorbimento termico, incenerimento).

5.1. Trattamenti chimici

I **trattamenti chimici** riguardano la trasformazione dello stato chimico degli inquinanti, finalizzato alla produzione di sostanze caratterizzate da una minore tossicità o da una ridotta/incrementata mobilità, questi comprendono:

- *Ossidazione* chimica, realizzata iniettando nella matrice contaminata una miscela costituita da un opportuno agente ossidante (perossido di idrogeno, permanganato di potassio) che consente la completa trasformazione della sostanza organica inquinante in anidride carbonica ed acqua, o la sua parziale detossicazione.

- *Riduzione*, impiegata per trasformare attraverso l'utilizzo di agenti chimici riducenti, alcuni composti dalla forma ossidata a quella ridotta, qualora quest'ultima presenti una minore tossicità.

- *Estrazione con solventi*: consiste nel trasferimento degli inquinanti dalla fase solida a quella liquida del suolo tramite l'utilizzo di agenti lisciviant (solventi organici, tensioattivi, acidi) al fine di poter successivamente raccogliere ed estrarre un percolato concentrato da avviare ad un opportuno trattamento in superficie.

- *Fissazione* tramite agenti chelanti: prevede l'iniezione di agenti chimici che legandosi con i contaminanti (ad es. metalli pesanti), ne riducono la mobilità, consentendone l'accumulo in determinate porzioni di suolo che possono successivamente essere rimosse e trattate in impianti ex-situ.

5.2. Trattamenti fisici

I **trattamenti fisici** invece, sono associati alla variazione dello stato fisico degli inquinanti, consentendone così il trasferimento tra le diverse fasi del suolo o la rimozione. Tra questi i più comuni sono:

- *Solidificazione/stabilizzazione,* si basa sull'aggiunta di agenti chimici (organici o inorganici), che intercettando la sostanza inquinante producono una massa stabile di maggiore integrità fisica e ridotta permeabilità rispetto alla matrice solida del suolo, conferendole appunto una maggiore stabilità.

- *Trattamenti termici:* sono interventi ex-situ che si basano sull'incenerimento, la gassificazione o la pirolisi, che comportano a differenti condizioni di temperatura, la volatilizzazione dei composti inquinanti e la loro rapida ossidazione. In questa categoria rientra anche la *vetrificazione,* che consiste nella fusione del suolo a

temperature estremamente elevate (1000 - 1700° C) con conseguente formazione di una matrice amorfa nella quale si concentrano gli inquinanti che non volatilizzano.

- *Rimozione e stoccaggio in discarica:* questo tipo di intervento, seppur non costituisce un vero e proprio metodo di bonifica, è solitamente utilizzato per tutti quei casi in cui possa risultare inefficace o troppo costosa qualsiasi tecnica di bonifica. Consiste nell'asportare fisicamente il terreno dal sito contaminato e trasportarlo in una discarica dove verrà incapsulato per tempi indefiniti mediante opere di impermeabilizzazione di fondo, laterale e superficiale al fine di impedire la propagazione della contaminazione pe opera degli agenti meteorici.

La maggior parte di questi interventi comprendono quindi l'utilizzo di varie sostanze chimiche, solventi, agenti riducenti; sostanze di per se tossiche, che possono portare a problemi ancor più gravi in caso di errate dosature, o intercettazione delle falde acquifere; è noto anche negli interventi di phytoremediation che dosaggi di agenti chelanti, per facilitare l'estrazione dei metalli, di poco superiori a quelli necessari possano portare ad un'eccessiva movimentazione dei metalli nel suolo col rischio di percolazione nelle falde; lo stesso vale per i trattamenti fisici come quelli che richiedono l'utilizzo del calore che causano la traslocazione in atmosfera delle sostanze tossiche volatili, nonché la distruzione della sostanza organica e gli organismi animali e vegetali presenti nel suolo.

Tutti questi interventi sono oltremodo costosi, laboriosi ed invasivi, con risultati non del tutto sicuri per la flora e la fauna che ripopoleranno tali aree; anche il metodo dell'escavazione e smaltimento in discarica, così come quello del '*pump and treat'* utilizzato per la bonifica delle acque, sono poco compatibili sotto il profilo della sostenibilità ambientale, infatti in entrambi i casi la risorsa contaminata non viene restituita al suo uso originario o potenziale.

Si osserva infatti che la rimozione del suolo e delle acque contaminate comportano un'azione di disturbo dell'ecosistema con la conseguente movimentazione di inquinanti nelle varie matrici ambientali in particolare nell'aria e nell'acqua.

Tabella 2 - Costo di un' intervento di phytoremediation con piante erbacee confrontato con altre tecnologie di bonifica (Schnoor, 1998)

TECNOLOGIA	COSTI ($/t)
Soil venting	20-220
Desorbimento termico	120-300
Soil washing	80-150
Solidificazione/Stabilizzazione	240-340
Estrazione con solventi	360-440
Incenerimento	200-1500
Conferimento in discarica	100-400
Bioremediation	50-150
Phytoremediation	**10-35**

5.3. Pro e contro della phytoremediation

Attualmente la *phytoremediation* appare come una tecnologia di bonifica ai primi stadi di sviluppo, ma l'avanzamento accelerato della ricerca in questo settore fa sperare che in un prossimo futuro possa occupare un posto preminente tra le tecnologie di bonifica. La sua applicazione su vaste aree caratterizzate da livelli medi di contaminazione permetterà di conseguire un elevato risparmio in termini di costi d'intervento, di recupero del valore ambientale, e la possibilità di reimpiegare

proficuamente i residui colturali nonché un grado di accettabilità pubblica molto elevato.

Sebbene in Europa la *phytoremediation* è ancora "confinata" nei centri di ricerca e accademici, lo sviluppo negli Stati Uniti di un vero e proprio mercato, costituito da società (Planteco, TreeTec Environmental Corp, Edenspace System Corp.), studi di consulenza e grosse compagnie industriali specializzati in differenti fitotecnologie, è la prova che esistono i presupposti per l'affermarsi di questo settore su scala mondiale.

A tal riguardo i vantaggi di questa tecnica sono numerosi:

- è applicabile ad una grande varietà di contaminanti: metalli pesanti, radionuclidi, solventi clorurati, idrocarburi, pesticidi clorurati, insetticidi organofosfati, erbicidi, esplosivi, policlorobifenili (PCB) e composti organici;
- riduce il volume dei rifiuti da smaltire in discarica, infatti un conto è smaltire la biomassa vegetale residua con un volume e peso relativamente ridotto, e un conto sarebbe smaltire o trattare una quantità di terreno di gran lunga più elevata, come solitamente si fa in interventi on-site e off-site con i relativi costi, e l'impatto ambientale delle operazioni di rimozione, trasporto e trattamento/smaltimento. Inoltre il volume e il peso della biomassa potrebbe ulteriormente essere ridotto a seguito della sua termo-conversione o per l'ottenimento di tantissimi derivati;
- è un metodo applicabile in situ, cioè sul suolo dove risiede la contaminazione, mentre i più comuni metodi di bonifica consistono nella rimozione del suolo e trattamento in loco per gli interventi on-site, e la rimozione e il trasporto del suolo nell'impianto di trattamento per gli interventi off-site.

Visto quanto detto fin'ora è sicuramente una tecnologia molto meno costosa, anzi se correttamente applicata con un bilancio positivo; è sicuramente una scelta socialmente accettata con un buon impatto estetico e rispettosa dell'ambiente in ogni sua fase, dall'impianto della coltura al riciclo dei residui.

Certamente i limiti da superare sono ancora molti:

- primo fra tutti la durata del trattamento, che appare inevitabilmente influenzata dai cicli biologici di crescita delle piante e dalle condizioni climatiche. La durata del trattamento varia profondamente a seconda delle condizioni del suolo, in particolare del tipo dei contaminanti e dalla loro concentrazione, dalla struttura e dalle proprietà chimico-fisiche del substrato, dalla biodisponibilità dei contaminanti nel suolo e dalle capacità di sviluppo e fitodegradazione/fitoestrazione delle piante scelte, nonché l'influenza delle condizioni climatiche; potendo compiersi nel giro di pochi mesi nel caso di lievi e superficiali contaminazioni, o impiegare oltre 5-10 anni nel caso di contaminazioni multiple e profonde, certamente valutando la convenienza socio-economica-ambientale dell'intervento (contaminazioni superiori al già elevato limite di tolleranza di queste piante renderebbero impossibile l'intervento);
- un altro svantaggio è rappresentato dalla capacità di esplorazione dell'apparato radicale, che limita il trattamento in caso di contaminazioni profonde, dove neanche un'aratura profonda riporterebbe in superficie i contaminanti;
- un ultimo svantaggio è rappresentato dalla grave possibilità di ingresso nella catena alimentare dei contaminanti, essendo i vegetali preda di numerosi animali erbivori, roditori e insetti.

Per concludere, il più grosso interrogativo da un lato, ma la prospettiva finale più innovativa e sostenibile della phytoremediation dall'altro, consiste proprio nel possibile riutilizzo delle biomasse vegetali.

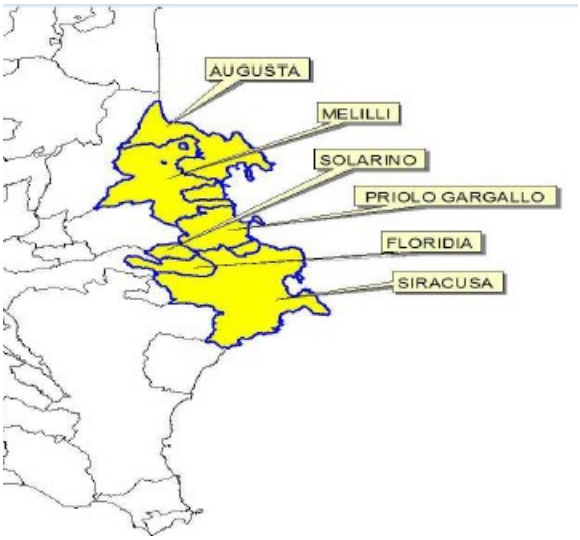
Ad esempio i metalli pesanti, possono essere recuperati a seguito dell'incenerimento delle piante e dal processo di termoconversione è possibile produrre energia, anche se per questa tecnica resta aperta la questione legata all'emissione in atmosfera delle nanopolveri. In alternativa, le biomasse sbriciolate e inglobate in materiali cementizi non alterabili potrebbero essere usati nella bioedilizia, per opere di riempimento del manto stradale o per la produzione di pannelli fonoassorbenti.

In questo modo i costi di bonifica della *phytoremediation*, già significativamente bassi, si ridurrebbero ulteriormente andando ad alimentare un ciclo di numerose e diversificate opportunità di lavoro.

6. AREA AD ELEVATO RISCHIO DI CRISI AMBIENTALE DI "SIRACUSA"

6.1. Descrizione dell'area

L'area dichiarata ad elevato rischio di crisi ambientale denominata "Siracusa" è costituita dai territori dei Comuni di Augusta, Priolo, Melilli, Siracusa, Floridia e Solarino in Provincia di Siracusa, per un'estensione complessiva di circa 550 km^2.



Il territorio così definito appartiene geograficamente alla Sicilia Sud-Orientale, presentandosi come un vasto piano inclinato verso il mare, quasi abbracciato da una sequenza di alture che vanno dalle balze su cui sorge Siracusa, alla netta muraglia dei monti Climiti ad ovest e delimitato, a settentrione dall'alveo del fiume Morello. A causa del complesso profilo geologico, la morfologia del territorio interessa settori prevalentemente collinari e montuosi e zone pianeggianti della fascia costiera.

L'area è quindi caratterizzata da una rilevante variabilità dei terreni e dalla presenza di habitat notevolmente differenziati che offrono in tutta la provincia orientale una vasta, seppur sottovalutata, produzione agricola di prodotti tipici, DOP o IGP; tra essi l'olio extra vergine di oliva dei Monti Iblei, le diverse varietà di arancia rossa di Sicilia Igp tra i comuni della provincia di Siracusa e Catania, il rinomato limone di

Siracusa Igp coltivato in 10 comuni della fascia costiera di Siracusa, tra cui Augusta, Melilli, Priolo e Noto fino ai comuni più interni di Floridia e Solarino; tra i vini il Moscato di Siracusa e il Nero d'Avola, e la patata novella di Siracusa che rappresenta la più importante risorsa ortofrutticola di questa provincia.

Per quanto concerne l'idrografia, ad eccezione del fiume Anapo e dei torrenti che sfociano nella baia di Augusta, il reticolo è formato da piccoli corsi d'acqua a regime torrentizio, con bacini imbriferi di modesta dimensione a prevalente andamento sub-ortogonale alla costa.

La presenza umana in questo territorio ha origini remote, come testimonia la ricchezza di beni archeologici e architettonici che oggi convivono con le trasformazioni dovute alla recente storia degli insediamenti industriali, contribuendo in tal modo alla formazione di un paesaggio segnato da complesse contraddizioni, ma ancora ricco di valenze da preservare e valorizzare.

Tra questi uno dei più importanti è certamente il sito dell'antica colonia di Megara Iblea cosparsa di templi e santuari ellenistici e da numerose necropoli tipiche delle antiche città greche come l'isola di Thapsos, compresa tra i comuni di Priolo Gargallo e Augusta, direttamente affacciata sul mare, in una posizione un tempo meravigliosa e oggi in pieno polo industriale.

Una deliberazione del Consiglio dei Ministri adottata il 30 novembre 1990 classificò il territorio della provincia di Siracusa come "aree ad elevato rischio di crisi ambientale", quasi dieci anni di lotte per far prendere atto alle amministrazioni comunali e regionali e alle istituzioni nazionali che esisteva una gravissima situazione di rischio e che dovevano essere presi immediatamente provvedimenti per evitare l'ulteriore aggravamento della crisi ambientale. Dopo cinque anni, nel gennaio 1995, è avvenuta l'approvazione del Piano di risanamento.

Con la legge 426/98 l'area di Priolo è diventato uno dei primi 15 siti di interesse nazionale (SIN) da bonificare perimetrato con Dm il 10 gennaio 2000 per una superficie totale di circa 3.350 ettari, comprendendo inoltre nei territori limitrofi, 12 Siti di Interesse Comunitario (S.I.C) e 3 Zone di Protezione Speciale (Z.P.S.).

Gli unici interventi tangibili, come dichiarano anche alcuni cittadini, sono i pozzi d'intercettazione degli idrocarburi nelle falde acquifere; per il resto siamo ancora nella fase di caratterizzazione, di messa in sicurezza di emergenza e di progettazione degli interventi. Solo per pochissime aree sono in corso di realizzazione gli interventi previsti dalla progettazione definitiva.

6.2. Insediamenti produttivi

Fino all'inizio degli anni Cinquanta dello scorso secolo questa zona era caratterizzata da una modesta economia basata sull'agricoltura, sulla pastorizia, sull'artigianato e sulla pesca; poche e piccole erano le industrie presenti, e si interessavano per la maggior parte alla trasformazione ed alla conservazione dei prodotti del suolo e della pesca, ad Augusta ed in qualche altra zona costiera sorgevano le saline.

La prima raffineria, la Rasiom di Moratti, risale ai primi anni '50, quando il consorzio per l'Area di sviluppo industriale (l'Asi, di cui facevano parte tutti i maggiori enti pubblici, come la Provincia e il Comune di Siracusa, il Banco di Sicilia, l'Istituto Immobiliare, l'Ept di Siracusa, etc.), decide di lottizzare trenta

chilometri di costa tra Augusta e Siracusa per dare inizio a quello che sarebbe stato il più grande disastro ecologico siciliano.

La scelta di Augusta fu determinata dal fatto che essa si trovava in una zona pianeggiante, sulla rotta Suez-Gibilterra dove si registrava il maggior traffico del greggio proveniente dal Medio Oriente e dalla Russia, dalla facilità di approvvigionamento idrico, dalla grande disponibilità di manodopera a basso costo, dal porto naturale e dalla possibilità di utilizzare i serbatoi interrati ed il pontile della Marina Militare. Successivamente arrivano Esso (che acquisisce la Rasiom), Montedison, Enel, Liquichimica, Erg, i cementifici ed altre industrie sorte senza un piano razionale di sviluppo, senza impianti di depurazione e con decine di collettori di scarico a mare e/o nei piccoli corsi d'acqua. Nel 1958 la Montedison acquista quasi tutti i piccoli stabilimenti (come la Sincat o la Celene) a sud della rada di Augusta. Il polo industriale di Priolo, 43 milioni di m^2, è oggi una realtà molto complessa che interessa anche i comuni limitrofi di Augusta, Melilli, Siracusa, Floridia e Solarino.

Attualmente i principali insediamenti produttivi presenti nell'area industriale (zona sud dell'Area di Sviluppo Industriale della Sicilia Orientale), per il cui sviluppo infrastrutturale è stato costituito il Consorzio ASI di Siracusa, sono situati prevalentemente nel territorio dei Comuni di Priolo, Melilli ed Augusta e sono i seguenti:

- due centrali termoelettriche ENEL a Priolo ed Augusta per la produzione di energia elettrica;
- stabilimento PRAOIL a Priolo per la raffinazione del petrolio greggio;
- stabilimento ENICHEM a Priolo per la produzione di prodotti chimici di base;
- stabilimento ENICHEM AUGUSTA ad Augusta per la produzione di prodotti chimici di base;
- stabilimento ESSO ad Augusta per la raffinazione del petrolio greggio;
- stabilimento ISAB a Priolo per la raffinazione del petrolio greggio;
- stabilimento SARDAMAG a Priolo per la produzione di ossido di magnesio;

- stabilimento CEMENTERIA DI AUGUSTA per la produzione di cementi;
- ISAB Energy, Impianto IGCC;
- Polimeri Europa;
- Syndial s.p.a.;
- Industria Acqua Siracusana.

Questo polo industriale rappresenta uno dei principali siti nel Mediterraneo in termini di capacità produttiva; è il maggiore punto di raffinazione d'Europa (320 mila barili di petrolio al giorno) con una capacità di stoccaggio di oltre 4 milioni di metri cubi tra prodotti e materie prime, producendo complessivamente oltre il 50 per cento delle benzine utilizzate nel nostro Paese; ciò nonostante l'intero polo negli ultimi 30 anni ha perso circa 12 mila lavoratori, passando da 20 mila a circa 8000.

Per capire l'entità delle attività produttive che attualmente si svolgono nel sito in questione, esse possono essere divise in tre gruppi principali:

- il centro petrolifero, di cui fanno parte Erg, che comprende la raffineria Isab impianti nord e la raffineria Isab impianti sud, ed Esso;

- il centro petrolchimico di cui fanno parte Syndial e Polimeri Europa, possedute al 100% da Eni;

- altre imprese chimiche, come la Sasol e la Air liquid.

Secondo i dati del rapporto dell'Osservatorio, il **centro petrolifero** copre una superficie di circa 3.400 ha (600 l'impianto Erg e 2.800 quello Esso) ed impiega più di 2 mila addetti (1.355 all'Erg e 713 alla Esso). Per avere un ordine di grandezza dell'insediamento produttivo la capacità di stoccaggio, tra greggio, semilavorati e prodotti finiti, per Erg è di 4,5 milioni di m^3, tra impianti nord e sud, e per Esso è di 2,8 milioni di metri cubi, contenuti in 273 serbatoi.

Il **centro petrolchimico** occupa invece una superficie di circa 460 ha (310 per gli impianti di Syndial e 150 per quelli di Polimeri Europa) per un totale di quasi mille addetti (400 Syndial e 597 Polimeri Europa). La Syndial tra impianti di clorosoda e

dicloroetano produce all'incirca 80 Kt/a (28 Kt/a di cloro, 30 Kt/a di soda e 22 Kt/a di dicloroetano, per il prossimo futuro è prevista la chiusura totale di quest'ultimo impianto). Gli impianti per la produzione di cloro utilizzano ancora la tecnologia delle celle a mercurio, nonostante esistano tecniche molto meno impattanti come quella a membrana. Gli stabilimenti di Polimeri Europa comprendono gli impianti olefine (impianto di cracking che lavora cariche liquide - gasolio e virgin nafta - e gassose - etano e Gpl), gli impianti polietilene e quelli relativi agli idrocarburi aromatici. I primi producono 3.831 Kt/a (etilene, propilene, benzine e frazione C4), i secondi 185 Kt/a (propilene), i terzi 1.310 Kt/a (benzene, toluene, etilbenzene, P-xilene, O-xilene, cumene).

Infine il terzo grande polo è rappresentato dalle **imprese chimiche** Sasol e Airliquid. La prima occupa una superficie di oltre 136 ha e impegna un totale di 525 addetti, la seconda, divisa in Centrale 1 e Centrale 2, occupa una superficie di circa 6 ha per un totale di 47 addetti. La produzione della Sasol comprende principalmente paraffine, olefine, alchilati e alcoli per un totale di 930 Kt/a. La Airliquid produce azoto (gassoso e liquido), ossigeno (gassoso e liquido) e argon (liquido) per un totale di 149.500 Nm^3/h circa.

6.3. Stato dell'ambiente

6.3.1. Inquinamento atmosferico

La qualità dell'aria nel triangolo industriale viene monitorata dal C.I.P.A. (Consorzio Industriale Protezione Ambiente) consorzio fondato nel 1975, formato dalle aziende operanti nell'area del siracusano come strumento di controllo della qualità dell'aria e più in generale come servizio di informazione per le comunità locali sulle problematiche ambientali che interessano la zona industriale aretusea, che è consorziato con Confindustria, e dall'ARPA che effettua i controlli nei centri urbani siracusani e in generale nei paesi della provincia dichiarati a rischio.

Ma purtroppo finora la qualità dell'aria interna agli stabilimenti industriali, non viene monitorata da nessuna istituzione. Per quanto riguarda i microinquinanti potenzialmente emessi dagli impianti di combustione, si segnalano il benzolo, gli idrocarburi polinucleari aromatici, il piombo, il rame, il vanadio, il nichel ed il cromo. Per tali microinquinanti non è possibile ad oggi effettuare, in assenza di un monitoraggio sistematico e condotto con criteri omogenei, una valutazione complessiva dello stato di qualità dell'aria. Il benzene è stato classificato dalla IARC (International Agency for Research on Cancer) tra i cancerogeni certi. Studi epidemiologici hanno dimostrato chiaramente l'associazione tra esposizione al benzene e patologie di tipo leucemico, nonché l'interazione tra i prodotti metabolici del benzene e il DNA, con effetti mutageni e teratogeni. Non solo, gli organismi scientifici nazionali e internazionali ritengono che sia opportuno essere cautelativi e considerare esistente un rischio, anche se piccolo, per bassi livelli di esposizione.

La raffineria Praoil è caratterizzata da 24 punti di emissione che convogliano e disperdono in atmosfera i fumi derivanti dalle combustioni di gas autoprodotto ed olio combustibile.

Gli stabilimenti Enichem Anic ed Enichem Polimeri, convogliano le loro emissioni in atmosfera attraverso 73 camini.

Lo stabilimento Enichem Agricoltura convoglia le emissioni in atmosfera attraverso 23 camini mettendo quantitativi non trascurabili di ammoniaca e fluoro.

Lo stabilimento Isaf convoglia le emissioni in atmosfera mediante 20 punti di emissione ed è responsabile di emissioni consistenti di biossido di zolfo dall'impianto di acido solforico e di piccoli quantitativi di polveri, fluoro, ammoniaca ed acido fosforico dall'impianto MAP.

In sintesi, per l'intero Polo Petrolchimico, i dati disponibili consentono di rilevare che:

- le emissioni di biossido di zolfo ammontano a circa 84.000 t. all'anno e sono dovute per il 98 per cento circa alle attività dello Stabilimento Praoil, responsabile dell'emissione di circa 82.000 t. all'anno delle quali circa 78.800 t. sono conseguenti alla produzione di energia elettrica;

- per quanto riguarda le emissioni di ossidi di azoto, pari a circa 8.800 t., esse risultano in prima approssimazione da attribuire principalmente allo Stabilimento Praoil; tale stabilimento è anche responsabile del 90 % circa delle emissioni totali di polveri (1.840 t. su 2.050 t.);
- le emissioni annue di dicloroetano, pari a circa 26 t., e di cianuri, pari a circa 11 t., sono da attribuirsi integralmente allo Stabilimento Enichem Anic.

A completamento del quadro conoscitivo delle emissioni in atmosfera dell'intero polo petrolchimico occorre evidenziare le carenze informative relativamente ai dati sulle emissioni diffuse dai serbatoi di stoccaggio.

6.3.2. Inquinamento idrico e del suolo

Nella zona del petrolchimico oltre l'aria insalubre vi è il problema dell'avvelenamento dei fiumi, dell'inquinamento della falda acquifera e, non ultimo, il rischio sismico. Più volte infatti è stato sottolineato che numerosi serbatoi delle raffinerie ormai obsoleti non sono adeguati per sopportare un eventuale terremoto a

cui la zona è particolarmente esposta. E quando non sono le scosse della terra a preoccupare, sono le fiamme.

Diversi roghi partiti nei pressi della centrale elettrica Tifeo e della raffineria Esso hanno messo a rischio l'incolumità di centinaia di persone. Inoltre gli ambientalisti che da tempo tengono sotto controllo il fiume Cantera, si preoccupano in quanto questo è un corso d'acqua che sbocca direttamente in mare e passa vicino ai serbatoi dello stabilimento Esso e della centrale Enel Tifeo in prossimità dell'oleodotto Isab.

Legambiente, le Associazioni AugustAmbiente e Decontaminazione Sicilia hanno più volte denunciato lo sversamento di sostanze inquinanti nel fiume, ma senza ottenere risultati.

L'ultimo incidente si è verificato a giugno 2013: circa 400 tonnellate di idrocarburi finite nel torrente avrebbero contaminato l'acqua e il terreno circostante per uno strato di circa 20 centimetri. Per anni nelle acque della rada di Augusta a causa della produzione di cloro e soda si sono accumulate enormi quantità di mercurio che, come metilmercurio, entrava nella catena alimentare (pesci e mitili). Dopo anni di contenzioso l'impianto è stato smantellato e fermato definitivamente dalla Syndial (gruppo Eni) nel 2006.

Incredibilmente, il Tar Sicilia, sezione di Catania, ha stabilito che le imprese del polo petrolchimico siracusano del triangolo Augusta-Melilli-Priolo non dovranno farsi carico dei costi della bonifica della rada di Augusta inquinata da arsenico, mercurio ed altre sostanze dannose. Legambiente fa giustamente osservare che è una sentenza che va contro il principio stabilito dalla Corte di giustizia europea, secondo cui "chi inquina paga".

6.3.3. Rischi sanitari

Le cause del degrado ambientale dell'area e del rischio per la popolazione che vi abita possono essere sintetizzate in 4 principali problematiche:

- il rilascio nei suoli e nelle acque di diverse sostanze tossiche quali ammoniaca, acido fluoridrico, cloro, idrogeno solforato, mercurio (utilizzato per la produzione di cloro dal sale marino negli impianti clorosoda);

- elevata presenza di discariche, di cui molte abusive, all'interno e all'esterno dell'area industriale per lo smaltimento dei rifiuti speciali: su 170 mila tonnellate annue, 1.300 t sono classificate come rifiuti pericolosi e non esistono adeguati sistemi di smaltimento;

- il depauperamento della falda idrica, a causa dei massicci emungimenti da parte delle aziende del polo petrolifero, tanto che si è verificato un forte abbassamento del livello piezometrico. La conseguente intrusione di acqua di mare ha notevolmente innalzato la salinità delle acque rendendo inutilizzabili molti pozzi a scopo potabile. Inoltre, le perdite dai parchi serbatoi, dagli impianti e dalle tubazioni ha causato il massiccio inquinamento della falda, anche a livello profondo, con idrocarburi di varia natura, soprattutto nelle aree intorno a Priolo ed ai vari impianti;

- il degrado della qualità dell'aria connessa all'elevate emissioni di SO_2, NOX, CO, CO_2, polveri sottili, composti organici volatili, ovvero dei macro e microinquinanti emessi dai camini delle industrie del polo petrolchimico, che determinano il verificarsi di frequenti fenomeni di smog fotochimico con relative alte concentrazioni di azoto.

Si riportano testualmente le conclusioni del recente rapporto dell'**O.M.S.**: *"nell'area di Augusta-Priolo i risultati mostrano un profilo di mortalità differente per i due sessi. Si registrano, infatti, eccessi significativi concentrati nelle zone più vicine al polo petrolchimico, solamente per gli uomini, nelle cause tumorali e nel tumore polmonare, mentre tra le donne non si registrano eccessi di mortalità. Inoltre il rischio di contrarre un tumore polmonare, sempre negli uomini, è in aumento per le generazioni più giovani, fatto che fa prevedere il persistere di rischi elevati negli anni futuri".*

L'edizione del 2009 del Registro dei tumori di Siracusa, riguardante i casi di cancro nella provincia aretusea, presentata in occasione della XIII riunione scientifica annuale dell'Associazione Italiana Registri Tumori (AIRTum), tenutasi a Siracusa,

ha evidenziato che i tumori hanno una maggiore incidenza nell'area del triangolo industriale siracusano rispetto al resto della Sicilia. Augusta, che assieme a Priolo e Melilli fa parte del maggiore polo petrolchimico d'Italia, fa registrare un TSI (Tasso Standardizzato di Incidenza) di 609 nuovi casi annui per 100 mila abitanti, il valore più elevato non solo del Registro del Sud Italia, ma anche della media del pool Italia (552,8).

Anche Priolo presenta un TSI superiore a quello italiano con 565,3 casi l'anno, mentre Melilli è al di sotto del pool Italia con 387,1. Da ciò si evince che sia Augusta che Priolo sono più esposte rispetto a Melilli per caratteristiche idrogeologiche, orografiche ed occupazionali. I tumori che hanno una maggiore incidenza nel triangolo industriale, rispetto alla media italiana sono 5: tumori del fegato e della tiroide in entrambi i sessi, il tumore dell'utero nelle donne ed i tumori della pleura e della vescica tra i soli uomini.

Ad Augusta i dati forniti dall'Assessorato Regionale alla Sanità indicano tra gli uomini aumenti per il tumore maligno della trachea, bronchi e polmoni (+24%), della pleura (+428%), per le malattie psichiatriche (+58%), per le malattie cerebrovascolari (+14%) e per le malattie respiratorie acute (+132%). Mentre per le donne vanno segnalati il mieloma multiplo (+120%), le malattie del sistema nervoso (+52%), le malattie respiratorie acute (+86%), le malattie dell'apparato digerente (+21%), la cirrosi epatica (+32%) e gli avvelenamenti (+24%). Per quanto allarmanti, i dati sono sottostimati in quanto riferiti alla mortalità e non all'incidenza, dato che non tutti i soggetti che si ammalano di tumore muoiono per esso. Per quanto riguarda invece il numero di malformazioni neonatali, nell'ultimo triennio nella città di Augusta queste apparentemente sembrano diminuire, ma nella realtà non è così.

Infatti, come da studi effettuati da Anselmo Madeddu, direttore del Registro Tumori di Siracusa, le interruzioni di gravidanza ad Augusta sono quadruplicate rispetto alla media nazionale e un terzo di queste, presentano malformazioni neurocerebrali. Responsabili delle malformazioni sono i metalli pesanti che entrano nella catena alimentare, in principal modo il mercurio, che reca danni al sistema nervoso centrale del feto. Recenti studi effettuati da Giacinto Franco, uno dei primi medici a denunciare le malformazioni neonatali a causa dell'inquinamento industriale, sui

capelli di donne in età fertile residenti nel triangolo industriale, hanno rilevato quantità elevate di mercurio, pari a 0.17/0.18 mg/100 mg, quando i limiti previsti dalla legge sono di 0,006 mg/100 mg.

Una delle denunce più inquietanti arriva proprio da Giacinto Franco ex primario di pediatria dell'ospedale augusteo: *«nell'ultimo ventennio sono nati oltre 20 bambini l'anno con malformazioni e l'incidenza di modificazioni genetiche sulla popolazione esposta all'inquinamento chimico è pari al 5,6% contro il 2% della soglia massima indicata dall'Oms».*

Invece, la mortalità per cause tumorali degli abitanti dei Comuni che rientrano nel raggio di 40 km dallo stabilimento è superiore del 10% di quella della restante popolazione siciliana e di gran lunga superiore alla stessa media nazionale.

Secondo uno studio che la Procura ha effettuato su 600 coppie di genitori locali, la metà delle quali hanno avuto figli con malformazioni, si è riscontrato, comparando gli stili e le abitudini alimentari nel periodo della gestazione di questi due gruppi di coppie, che una quota significativa tra quelli che hanno poi avuto figli con malformazioni avevano utilizzato pesce proveniente dalla rada di Augusta. Infine per quanto riguarda i laboratori degli stabilimenti, quelli più a rischio sono quelli dell'area 22 dell'Erg Nord, una discarica a cielo aperto di rifiuti tossici di derivazione industriale, sequestrata qualche anno fa dalla magistratura, poi riaperta abusivamente per costruirci caldaie di centrali termoelettriche, ma mai bonificata. Secondo le dichiarazioni di alcuni lavoratori, le soglie di allarme benzene, nell'area 22, scattano circa ogni ora, superando i valori limiti. E nonostante ciò "qualcuno" li esorta comunque ad entrare in quell'area e continuare a produrre.

7. SPECIE UTILIZZABILI IN SICILIA

Ai fini di tale studio e in funzione delle condizioni pedoclimatiche che caratterizzano la Sicilia, con riferimento soprattutto al tipico clima mediterraneo con estati calde e siccitose e la conseguente scarsezza di risorse idriche; ho selezionato delle colture erbacee ampiamente diffuse allo stato spontaneo nel territorio siciliano, che soprattutto grazie alla limitata richiesta di input rispecchiano a pieno tali requisiti, prestandosi dunque per una conveniente e possibile applicazione nelle diverse aree degradate della regione. Inoltre la produzione di biomassa di queste specie, nella maggior parte dei casi elevata, ne prospetta un proficuo reimpiego nel campo delle bioenergie, dei biocombustibili, e delle bioraffinerie per la produzione di numerose sostanze e materiali biodegradabili.

7.1. Arundo donax L.

Nome comune: Canna comune o domestica

Inquadramento botanico: Famiglia *Poaceae*, Genere *Arundo*, Specie *A. donax L.*

Origine e diffusione: La sua area di origine si estende dal bacino del Mediterraneo al Medio Oriente fino all'India, ma attualmente la si può trovare sia piantata che naturalizzata nelle regioni temperate e subtropicali di entrambi gli emisferi.

Descrizione della specie: La canna comune o domestica, è una pianta erbacea perenne che forma dense macchie in terreni umidi e riparali nei pressi di fiumi e stagni, ma anche in terreni sabbiosi e relativamente poveri. È la più grande tra le canne d'Europa, con un tasso di crescita fino a 5 cm al giorno raggiunge generalmente i 3-4 m di altezza ma in condizioni ideali può anche superare gli 8-9 m, con fusti, detti culmi, cavi all'interno e del diametro di 2–3 cm. Le foglie sono alternate di forma lanceolata, di colore grigio-verde, lunghe 30–60 cm e larghe 2–6 cm.

Fiorisce in settembre-ottobre producendo pannocchie piumose fusiformi, di colore dal verde pallido al violaceo, lunghe 40–60 cm e con portamento verticale.

I fiori sono monoici e i semi prodotti raramente fertili, dunque la loro riproduzione avviene principalmente per via agamica o vegetativa, attraverso rizomi sotterranei.

Esigenze e tecnica colturale: Grazie alla sua elevata rusticità, adattabilità e resistenza agli stress idrici e termici, l'*A. donax* può essere coltivata su un grande numero di tipi diversi di suolo e nelle condizioni climatiche più varie. Produce un apparato radicale profondo anche un metro, riuscendo ad ottenere alte rese unitarie anche in condizioni asciutte (15-20 t ha^{-1} di s.s.).

Inoltre raggiunge la maturità (lunghezza di 5–6 m) in circa un anno e, a seconda del clima in cui è cresciuta, può essere raccolta da una a 3 volte l'anno. Un campo di canna domestica può essere sfruttato per 15-20 anni rinnovando quando necessario le parti di rizoma esaurite, e impiegando limitate quantità di sostanze fertilizzanti e diserbanti.

La pianta essendo caratterizzata dalla sterilità del seme, si propaga vegetativamente impiegando porzioni di rizoma portanti almeno una gemma, o porzioni di fusti maturi (> 2 anni di età).

Partendo dal rizoma il trapianto è effettuato a fine inverno – inizio primavera, mentre il fusto può essere interrato a inizio inverno.

L'impianto della coltura deve essere preceduta da una lavorazione profonda del terreno per favorire l'approfondimento dell'apparato radicale e l'immagazzinamento dell'acqua, seguito da un'erpicatura per la frantumazione delle zolle. La densità di semina suggerita è di 10.000 rizomi/ha da interrare a 15 cm di profondità e a distanza di circa 1m x 1m, mentre i segmenti di culmo di circa 1 m di lunghezza vanno interrati a distanza di 50-70 cm tra le fila. Essendo una pianta spontanea e rustica tipica degli ambienti mediterranei non necessita di particolari cure colturali. Di norma la raccolta avviene con mezzi meccanici una volta l'anno. Nel caso in cui la coltura sia destinata alla conversione termo-chimica la raccolta avviene durante il periodo di stasi vegetativa, ossia quello invernale in quanto il prodotto presenta un maggior contenuto energetico; nel caso sia destinato alla produzione di bio etanolo il

prodotto deve essere poco lignificato, conseguentemente dovrà essere raccolto nel periodo estivo.

Utilizzi: Questa pianta è stata coltivata in tutta l'Asia, in Europa meridionale, in nord Africa e in Medio Oriente per migliaia di anni. Le canne contengono silice e forse questa è la principale ragione per la loro resistenza e durabilità.

In passato sono state utilizzate per creare siepi frangivento, per realizzare canne da pesca, carta, strumenti musicali e supporti per piante rampicanti. Dato il suo ritmo di crescita molto elevato e altrettanta la produzione di biomassa, la specie *A. donax* costituisce un ottimo candidato per la produzione di: biocarburanti, a seguito della digestione anaerobica dei materiali lignocellulosici quali culmi e foglie, è possibile ottenere biogas, oppure bio-etanolo in seguito alla fermentazione alcoolica dei glucidi in essi contenuti; come combustibile di alta qualità per la produzione di energia o come fonte di cellulosa per l'industria della carta e dei polimeri.

Grazie alle sue peculiarità quali: rapidità di crescita, scarse esigenze colturali, adattabilità a diverse condizioni pedologiche e di siccità, apparato radicale profondo ed elevata produzione di biomassa, unitamente alle capacità di iperaccumulo si presta perfettamente per applicazioni in siti fortemente inquinati da sostanze organiche o metalli pesanti come Pb, Cd e Ni e capace di non mostrare sintomi di tossicità fino a 600 $\mu g\ L^{-1}$ di As. La capacità di accumulo avviene principalmente a carico della parte aerea della pianta (steli e foglie), permettendo quindi una facile rimozione dal sito.

Vari studi hanno valutato le capacità di fitoestrazione potenziali di piombo, zinco e cadmio, rispettivamente pari a 0.54, 1.43 e 0.08 kg ha. Sono state riscontrate, inoltre, positive capacità di ridurre il carico inquinante presente nelle acque reflue e di provenienza zootecnica utilizzando un sistema idroponico chiuso o altri (Gou e Miao 2010). Importante inoltre, il vantaggio ecologico di non essere appetita dagli animali, e quindi evita la diffusione di sostanze tossiche e persistenti nella catena alimentare.

7.2. Brassica spp. L.

Nome comune: senape indiana (*Brassica juncea*), colza (*Brassica napus*)

Inquadramento botanico: Famiglia *Brassicaceae,* Genere *Brassica,* Specie *B. juncea L.* e *B. napus L.*

Origine e diffusione: Quasi tutte le Brassicaceae appartengono o provengono, in gran parte, dalla flora spontanea dell'Europa centrale e meridionale, in parte dell'Asia occidentale e centrale ed anche dell'Africa orientale; dunque, tutto il bacino del Mediterraneo si dimostra particolarmente interessato nell'evoluzione delle specie di questo genere. Per selezione naturale e incrocio nel corso di migliaia di anni, si sono sviluppati differenti tipi e forme di *Brassica.*; ai vertici del triangolo sono poste le specie *B. nigra, B. oleracea* e *B. campestris*, che per ibridazione interspecifica hanno dato vita a *B. Juncea, B. carinata* e *B. napus*.

Descrizione della specie: Il genere Brassica comprende tutte specie erbacee annuali e sotto il profilo morfologico non differiscono molto l'una dalle altre. Presentano un apparato radicale fittonante, non molto profondo (70-80 cm), e si espande soprattutto nei primi 35-40 cm di suolo.

Il fusto è eretto e ramificato, normalmente raggiunge un'altezza di 1,5 m e differenzia circa 20 foglie; nei primi stadi di crescita si presenta molto raccorciato e formato da una rosetta di foglie. Se le piante hanno spazio a disposizione, ramificano

abbondantemente, producendo germogli che partono dall'ascella delle foglie superiori e che sviluppano un'infiorescenza del tutto simile a quella principale.

Nella pratica però si tende a ridurre al minimo la ramificazione attraverso semine fitte, in modo da ridurre soprattutto la scalarità di fioritura e di maturazione.

Le foglie sono semplici, alterne, di colore verde glauco, dovuto alla presenza di abbondante pruina.

L'infiorescenza è un grappolo terminale, formata da 150-200 fiori ermafroditi, aventi la struttura tipica delle Cruciferae: presentano quattro petali a croce, sei stami e ovario supero, corolla gialla, raramente bianca. Il fiore è autofertile ed è possibile sia l'impollinazione anemofila che entomofila; la fioritura è scalare e dura circa un mese, il frutto che si sviluppa dal fiore fecondato è secco deiscente (siliqua) che può contenere da 15 a 40 semi, a seconda della varietà.

I semi sono piccoli, lisci e sferici, con tegumento di colore bruno rossastro che diventa più scuro col procedere della maturazione; 1000 semi pesano 3,5-5 grammi. Il 12-20% del peso del seme è rappresentato dal tegumento, tolto questo risulta composto da due cotiledoni e dall'embrione che contengono le sostanze di riserva.

L'embrione contiene in media 40-42% di olio e il 21-24% di proteine; nelle varietà primaverili il contenuto in olio aumenta progressivamente durante la maturazione, in quelle invernali invece, aumenta fino a quando la siliqua non assume la tipica colorazione giallognola, per poi diminuire a maturazione completata.

Esigenze e tecnica colturale: La Brassica spp. è una pianta microterma non necessita quindi di temperature elevate per svilupparsi. Lo zero di vegetazione è a 6-8°C e le varietà autunnali resistono molto bene al freddo. Questa specie teme periodi siccitosi soprattutto durante le fasi di levata e fioritura, predilige climi temperati, umidi, non troppo soleggiati; nel complesso, non è particolarmente esigente: predilige terreni profondi, freschi, fertili e leggeri, si adatta a quelli argillosi, calcarei e torbosi, purché ben drenati inoltre tollera sufficientemente la salinità e il pH del terreno.

Una distinzione tra le varietà viene fatta in base al ciclo produttivo: le varietà primaverili hanno ciclo primaverile-estivo, e sono diffuse soprattutto nel Nord

Europa e nel Canada; le varietà autunnali sviluppano un ciclo autunno-primaverile e per questo sono diffuse in ambienti con inverni non troppo rigidi come quelli mediterranei. Seminato tra fine settembre e i primi di ottobre, emerge dal terreno dopo 10-15 giorni con le due foglie cotiledonari; successivamente emette nuove foglie che formano una rosetta.

È proprio questo lo stadio di massima resistenza al freddo, é importantissimo quindi che le piantine di senape indiana o di colza, all'arrivo dei primi freddi invernali siano sviluppate in una rosetta di 6-8 foglie completamente formate a protezione dell'apice vegetativo. In questo stadio la pianta resiste anche a molti gradi sotto zero (-15°C), purché non vi siano ristagni d'acqua. Nel corso dell'inverno, sotto l'azione delle basse temperature, avviene il viraggio dell'apice, che cessa di accrescere le foglie per formare gli abbozzi fiorali.

Questo periodo di vernalizzazione è necessario, e si realizza con la permanenza, per almeno 40 giorni, a temperature inferiori a 10°C.

Nella prima decade di aprile, nonostante la pianta non abbia terminato la crescita vegetativa, inizia la fioritura: l'accrescimento si arresta in concomitanza con l'antesi dei fiori più alti. Non è raro infatti osservare sulla stessa infiorescenza la presenza contemporanea di fiori in boccio, fiori in antesi e silique. La raccolta viene effettuata con umidità del seme del 14% tra la seconda e la terza decade di giugno impiegando mietitrebbie per frumento opportunamente regolate.

Il contenuto in olio dei semi può raggiunge il massimo valore dopo circa 80 giorni dalla fioritura, e nonostante quest'ultima sia abbondante, molti fiori, soprattutto gli ultimi, non giungono a produzione e molti ovuli inoltre abortiscono.

Nelle regioni del Centro-Nord Italia può avvicendarsi al frumento; consegue ottimi risultati dopo leguminose pratensi o da granella mentre non risulta conveniente la successione a sé stesso. Particolare attenzione deve essere riservata alla preparazione del letto di semina, in quanto i semi sono di dimensioni ridotte. Normalmente viene eseguita un'aratura di media profondità (25-30 cm), seguono poi le erpicature per affinare il terreno. Per la semina, tra settembre e ottobre, si impiegano in media 5-7 kg di semi per ettaro, impiegando seminatrici di precisione, con una distanza tra le

file di 30 cm e posti a profondità non superiore ai 2 cm. La concimazione deve tener conto del modesto fabbisogno della pianta nel periodo autunnale, la dose di azoto totale si aggira intorno i 150 Kg/ha, da distribuire in presemina e levata, dimezzate rispetto a questo le dosi di P e K.

Utilizzi: Le varietà sono utilizzate, negli ambienti nordici come Canada, Stati Uniti, Regno Unito, Germania, Francia e Olanda come foraggio per animali; ma la parte di valore della coltura è rappresentato dal seme, fonte di olio vegetale alimentare e come combustibile. Secondo il Dipartimento di agricoltura degli Stati Uniti nel 2000 la colza era la terza fonte di olio vegetale al mondo (dopo la soia e la palma) e la seconda fonte mondiale di proteine sebbene si raggiungesse soltanto un quinto della produzione di soia. In Europa, la colza soprattutto viene coltivata principalmente come foraggio e rappresenta la scelta europea prioritaria per evitare la dipendenza dalla soia.

L'olio ricavato dai semi della pianta viene usato in alimentazione dopo essere stato raffinato e miscelato ad altri oli poiché all'origine ha sapore e odore poco gradevoli, dalla lavorazione dei semi inoltre, si produce un residuo usato nell'alimentazione degli animali da allevamento. Questo sottoprodotto è un alimento molto ricco di proteine, usato principalmente per nutrire i bovini, che può competere con la soia.

La coltura inoltre viene utilizzata come coltura di copertura invernale, provvedendo ad una buona copertura del suolo in inverno, e limitando il dilavamento dell'azoto. Dall'olio di questa coltura infine, così come per le altre oleaginose, è certamente possibile produrre biodiesel; secondo la Coldiretti dalle oleaginose come la colza sono ricavabili 850 kg di biodiesel per ettaro, mediamente un veicolo consuma più di una tonnellata di biodiesel all'anno per cui da solo non potrebbe sicuramente soddisfare le esigenze del paese.

Per quanto riguarda i processi di fitoestrazione, i dati riportati in letteratura circa le capacità di queste piante sono molto numerosi; i metalli in questione comprendono soprattutto Cd, Ni, Cu, Zn, Cr, Se (meno 15% del totale in pieno campo in un anno. Banuelo S. 1993) e in particolare Pb.

Le diverse sperimentazioni hanno riguardato soprattutto le specie *B. napus, B. nigra e B.juncea,* e le loro simili potenzialità sono dovute sicuramente al comune corredo genetico da cui hanno avuto origine queste specie.

Valori di accumulo compresi tra 130 e 8.200 mg/kg di sostanza secca sono stati osservati per il Pb a carico delle radici e delle foglie di queste piante; e tra queste *B.juncea* si è mostrata la più efficiente con una quantità di Pb nei tessuti pari al 3.5% del suo peso secco.

Secondo dati dell'EPA per queste specie l'accumulo del Pb avviene a carico dei germogli e delle radici, con valori nettamente più elevati per quest' ultime; rispettivamente tra 12.3 e 103.5 mg/kg nella *B. juncea*, tra 10,7 e 106,6 *per B. nigra* e 11.9 e 61,2 per *B. napus*. (piante coltivate per 20 giorni in substrato di sabbia e perlite, miscelate a varie concentrazioni di Pb).

Un'ulteriore sperimentazione sulle *B. juncea*, assieme ad altri generi di piante, è stata effettuata in Italia nella città di La Spezia, con il progetto Phyles in un sito contaminato da attività metallurgiche e la specie in questione ha mostrato la più alta efficienza nell'estrazione del Pb tra quelle utilizzate.

7.3. Cannabis sativa L.

Nome comune: Canapa

Inquadramento botanico: Famiglia *Cannabaceae,* Genere *Cannabis*, Specie *C. sativa*,

Origine e diffusione: Originaria dell'Asia centrale e meridionale, compreso il subcontinente indiano. Generalmente accetta l'ipotesi secondo cui questa specie sia giunta in America dopo i viaggi di Cristoforo Colombo, tuttavia alcuni scienziati hanno trovato residui di questa pianta in numerose mummie scoperte in Perù. A livello mondiale è coltivata soprattutto in Asia (India e Cina), in America, in Europa dell'est e in Russia.

Descrizione della specie: La Cannabis sativa è una specie annuale a fusto eretto, più o meno ramificato a seconda della cultivar e della fittezza dell'impianto, dapprima pieno e poi cavo alto da 1 a 4 m. Le foglie sono prevalentemente opposte, picciolate, palmosette, con tre-nove segmenti lanceolati, seghettati e pubescenti.

La radice è un robusto fittone con esili ramificazioni laterali che si allunga considerevolmente fino al primo mese della crescita, in seguito il fusto si accresce molto velocemente fino alla fioritura, momento in cui si arresta e si sviluppano gli internodi fiorali. La canapa è una specie prevalentemente dioica, caratterizzata quindi da piante maschili e femminili. I fiori maschili si differenziano almeno dopo 60

giorni dalla germinazione, per circa un mese, riuniti in pannocchie ascellari. Quelli femminili, prevalentemente all'apice dei rami ma anche ascellari, si formano dieci giorni dopo, e assumono l'aspetto di ciuffi compatti.

Il frutto è una nocula ovoidale, comunemente chiamato seme di canapa, con superficie lucente di colorazione non uniforme dal bruno all'olivastro. A seconda delle varietà il peso di mille semi varia da 20 a 23 gr, con una produzione fino a 15 quintali ad ettaro, da cui estrarre un prezioso olio che si presta a vari usi. L'insieme delle fibre tessili, comunemente denominato tiglio, rappresenta il libro del fusto e si trova nella corteccia tra l'epidermide ed il canapulo (tessuto vascolare) e costituiscono il principale prodotto commerciale. Le fibre riunite in cordoni di varie dimensioni, si distinguono in primarie, più lunghe e larghe, e secondarie in base alle loro dimensioni e struttura.

Esigenza e tecnica colturale: Grazie al suo breve ciclo vegetativo ed alle molteplici varietà esistenti, questa pianta può adattarsi ai climi più diversi. Ad esempio in passato veniva coltivata dagli oltre mille metri, fino agli ambienti mediterranei del sud Italia.

I climi più favorevoli sono comunque quelli caldo-umidi delle regioni temperate, con temperature comprese tra i 20-25°C durante tutto il ciclo, che consentono lo sviluppo di grandi quantità di biomassa, teme però i freddi autunnali precoci.

Nel periodo che va dalla semina alla fioritura, i caldi precoci, specie se accompagnati da intensa aridità sono nocivi in quanto inducono la pianta a pre-fiorire e rimanere quindi di bassa statura. Un'abbondante umidità giova molto quando è coltivata su terreni permeabili, mentre è dannosa dove si verificano ristagni idrici prolungati.

La qualità e quantità della fibra prodotta risulta proporzionale alle condizioni di ospitalità del suolo; i migliori terreni sono quelli di medio impasto, profondi, permeabili e con alto tenore di sostanza organica. Buone rese (80-100 quintali/ha) possono essere ottenute anche su terreni meno dotati, a meno che non siano argillosi o ricchi di scheletro; bisogna inoltre garantire una buona esposizione alla luce.

Le esigenze nutrizionali della pianta sono abbastanza variabili; per una produzione di 100 q.li di S.S. sono necessari 90-120 kg/ha di azoto, dose che può essere ridotta ad

80 considerando l'apporto dei microrganismi azotofissatori, la sostanza organica è molto utile per incrementare la possibilità di ottenere produzioni qualitative, come le altre colture da rinnovo, la canapa prospera bene anche su compost o stallatico non molto maturo e di scarsa qualità.

Il fosforo è necessario in quantità modeste, 40-60 kg/ha e dosi maggiori si richiedono per il potassio, inoltre questa specie assorbe elevate quantità di calcio, ma raramente è necessario aggiungerlo nei nostri ambienti. Infine la coltivazione di questa pianta in sostanza non richiede ingenti quantità di pesticidi e fertilizzanti, ma essa stessa lascia il terreno in ottime condizione di fertilità.

Le lavorazioni del terreno iniziano in autunno con l'aratura accompagnata da una concimazione di fondo, successivamente seguono i lavori per la preparazione del letto di semina con erpice frangizolle per amminutare bene il terreno.

L'epoca di semina più adatta al centro-sud è il mese di marzo utilizzando una seminatrice da grano ponendo il seme ad una profondità di due/tre centimetri, il quantitativo da utilizzare varia a seconda che si tratti di produzione di fibra o da seme; nel primo caso la densità sarà di 100-150 piante/m^2 con un interfila di 12 cm per forzare lo sviluppo in altezza e ridurre lo sviluppo di ramificazioni, nel secondo caso al fine di ottenere una maggiore quantità di seme, bisogna permettere un'ottima ramificazione adottando una distanza tra le file di 50-70 cm con una densità di 30-50 piante/m^2.

La raccolta che avviene tramite sfalcio, per l'utilizzo della fibra avviene quando questa giunge a maturazione tecnica, ossia quando la parte basale del fusto passa dal colore verde al giallo pallido e la pianta perde le foglie, tale periodo a seconda della varietà e dell'epoca di semina va dalla seconda metà di luglio alla prima di agosto. Mentre la raccolta del seme, che avviene verso la fine di settembre, deve tener conto della maturazione disomogenea che segue lo stesso andamento della fioritura, cioè dal basso verso l'alto e dall'estremità dei rami verso la base, non è indicato ritardarla di molto perché a maturazione completa essi si disarticolano facilmente e cadono.

Utilizzi: Alla canapa si attribuiscono ottime capacità di fitoestrazione sia di contaminanti organici che di metalli pesanti (in particolare Pb, Cd, Cr, Hg, Zn e

sostanze radioattive) accumulati in percentuale variabile a seconda dell'elemento e dell'organo vegetativo.. Già nel 1998 la Phytotec, una società americana che si occupa di phytoremediation, e un istituto di ricerca ucraino sperimentarono le capacità di questa pianta nei pressi di Chernobyl.

Inoltre mediante esami di microscopia elettronica e ai raggi x è stato osservato un accumulo di Cu nelle cellule epidermiche delle foglie, mentre le fibre sembrano non essere interessate dall'accumulo prestandosi dunque per una più semplice e vantaggiosa utilizzazione.

Le colture da fibra, e in particolare la canapa, sono colture multiuso; questa caratteristica può, e deve essere sfruttata valorizzandone ogni sua parte, e non in considerazione soltanto della produzione di biocombustibili quali bioetanolo o biodiesel, certamente ottenibili da questa pianta.

La canapa infatti può essere utilizzata integralmente: dalla fibra lunga si ricavano tessuti per abbigliamento, arredamento, corde e tappeti in sostituzione a quelli di nylon derivati dal petrolio; dalla fibra corta si ottengono feltri isolanti in sostituzione alla fibra di vetro tossica da respirare, ma soprattutto la carta che mostra degli ottimi vantaggi. Prima dell'avvento del proibizionismo e da tempi remoti, la cannabis era diffusa nel mondo come materia prima per la produzione di carta.

Il colore bianco della fibra infatti è la materia prima ideale per la produzione di carta in quanto non necessita di solventi chimici per essere sbiancata. Il processo per ottenere le microfibre pulite dal legno degli alberi prevede l'uso di grandi quantità di acidi, operazione costosa ed inquinante non necessaria per la carta di canapa perchè la fibra e il legno in essa contenuta sono già di colore bianco e la carta stampabile o al massimo dovrà essere trattata con del perossido d'idrogeno (acqua ossigenata), inoltre è sottile, resistente e non ingiallisce col passare del tempo grazie alla bassa concentrazione di lignina (20% inferiore rispetto agli alberi).

Bisogna pensare, soprattutto all'impatto ambientale ed al costo derivante dall'abbattimento di centinaia di ettari di foreste ogni anno per la produzione di carta, quando a parità di superficie con una coltura annuale è possibile aumentare la resa in qualità e quantità.

Dal canapulo, cioè il residuo legnoso separato dalle fibre, si possono produrre pannelli isolanti fono e termo assorbenti, e materiale inerte per l'edilizia anche in questo caso con prestazioni e vantaggi economici e ambientali sorprendenti. Nel settore edile i prodotti che possono essere ricavati sia dal fiore che dal fusto sono tantissimi: cere, vernici, pannelli isolanti, intonaci e i blocchi prefabbricati o il cemento di canapa. Quest' ultimo rappresenta il prodotto più innovativo; è realizzato dalla combinazione della parte legnosa dello stelo, il canapulo, ed un legante a base di calce con l'aggiunta di acqua.

La canapa fa da materiale riempitivo, leggero, detto anche aggregato, mentre la calce da legante e conservante, il biocomposto che ne deriva è un materiale rigido e leggero allo stesso tempo. Recentemente al fine di rendere più efficiente e veloce l'operazione alcuni costruttori hanno cominciato ad utilizzare apposite attrezzature per spruzzare come riempimento per le pareti questo mix, oppure utilizzato come intonaco per esempio per l'upgrade termico di vecchie abitazioni in pietra, facendo fronte ad alcuni problemi di umidità e termici.

Il biomattone di canapa potrebbe sostituire il cemento e permettere una riduzione del consumo d'acqua fino al 90%, inoltre l'utilizzo del cemento incide del 40% sulle emissioni di anidride carbonica nel settore edile (Erich Trevisol). I vantaggi di questo materiale riguardano inoltre: l'inerzia termica, comportandosi da ottimo isolante e favorendo l'accumulo ed il graduale rilascio di calore, la traspirabilità permettendo il passaggio dell'umidità evitando problematiche di condensa, la capacità di trattenere carbonio e quindi ridurre l'inquinamento migliorando la qualità dell'aria all'interno e all'esterno dell'abitazione, isolamento acustico e termico, e soprattutto questo materiale alla fine della sua vita può essere totalmente riciclato rimpastandolo con acqua e calce, eliminando i problemi e l'impatto derivante dallo smaltimento dei calcinacci.

Dai semi infine, si ottiene un olio (30-40% del peso) contenete proteine ad alto valore biologico, proposto come rimedio per la carenza di proteine nei paesi del terzo mondo. Le proprietà di questo olio per usi industriale sono molteplici: dalla cosmetica (in sostituzione all'olio di balena o di sintesi), alla produzione di resine, cere, detersivi, saponi, lubrificanti e vernici non inquinanti, di qualità nettamente

superiore a quelle prodotte con i derivati del petrolio; in ultimo dalla cellulosa in generale, di cui la pianta è ricca, attraverso processi di polimerizzazione, si possono ottenere materiali plastici pienamente degradabili.

7.4. Chrysopogon zizanioides L.

Nome comune: Vetiver

Inquadramento botanico: Famiglia *Poaceae*, Genere *Crhysopogon*, Specie *C. zizanioides L.*

Origine e diffusione: originaria dell'India dove è popolarmente nota con il nome di Khus, e ampiamente coltivata nelle regioni tropicali del mondo. I maggiori produttori sono Pakistan, Sri Lanka, Birmania, Thailandia e Indocina. È stato inoltre naturalizzato in altre regioni, in particolare negli Stati Uniti.

Descrizione della specie: *Chrysopogon zizanioides* L., comunemente noto come vetiver, è una pianta erbacea perenne che colonizza rapidamente i terreni, può crescere fino a 1,5 metri di altezza e oltre. Gli steli sono alti e le foglie lunghe, sottili, e piuttosto rigide mentre i fiori sono di colore viola-marrone. Diversamente dalla maggior parte delle graminacee, che sviluppano radici orizzontalmente, le radici del vetiver crescono verso il basso, sino a 2-4 metri di profondità e sono molto fitte e voluminose. I suoi semi sono sterili, e la pianta non produce né rizomi né stoloni il che la rende una pianta non infestante. Mostra una grande resistenza a malattie e insetti fitofagi, inoltre la caratteristica di originare i nuovi getti da una porzione

legnosa sotterranea, ossia la corona, la protegge dagli incendi, dalle gelate e dal calpestio.

Esigenze e tecnica colturale: il Vetiver è una pianta molto poco esigente; adattandosi a temperature estreme comprese tra i -15 e +55° C può crescere in varie condizioni pedoclimatiche; dai climi tropicali e sub-tropicali a quelli mediterranei. Nonostante preferisca ambienti umidi e addirittura ristagnanti, grazie al suo profondo apparato radicale può prosperare in zone asciutte sopportando siccità prolungate. La temperatura ottimale del suolo per lo sviluppo delle radici è di 25°C ma continua comunque a svilupparsi fino ai 13°C. Mostra un'elevata tolleranza ad Al, Mn e metalli pesanti presenti nel suolo quali As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se e Zn.

I metodi più comunemente applicati per la propagazione del vetiver sono:

- divisione dei getti maturi dai cespi della piante madre; si ottengono così cespi a radice nuda, utili per il trapianto immediato o la coltivazione in polybags;
- uso di sezioni della pianta madre, (culmi, gemme o corona);
- moltiplicazione da gemma viva o micropropagazione in vitro per una produzione su larga scala.

La piantumazione negli ambienti mediterranei avviene nel periodo invernale per poter beneficiare delle precipitazioni. Le piante ben radicate con 2-3 getti ciascuna, vengono poste in solchi larghi e profondi 15-20 cm, cui seguirà un'annaffiatura pressoché quotidiana nelle prime 2 settimane, dopo di che la pianta non necessiterà di successive irrigazioni.

Nel caso di interventi di contenimento dei fenomeni di erosione vengono piantate a distanza di 15 cm sulla fila in modo da formare, una volta mature, una fitta barriera che agisca da tampone per il flusso d'acqua lungo i pendii, e lungo la verticale la distanza tra le file può variare da 0,8 m fino ai 4 m a seconda della pendenza, delle caratteristiche del suolo e quindi dello scopo della sistemazione. Una volta cresciute queste vere e proprie "siepi erbacee", possono produrre oltre le 50 t ha^{-1} di s.s. nelle zone d'origine, che viene sfalciata ad un altezza di 15-20 cm dal suolo 2-3 volte

all’anno per eliminare le foglie secche, favorire la produzione di nuovi getti ed asportare il materiale contaminato.

Utilizzi: In India le sue radici servivano a tessere tende che andavano poi inumidite al fine di rinfrescare l'aria e diffondere una profumo delizioso. È soprattutto impiegata in opere di bioingegneria in quanto: grazie al suo apparato radicale profondo ed esteso riduce efficacemente il rischio di smottamento nei pendii, e la sua folta vegetazione riduce i fenomeni di deflusso superficiale delle acque del 70% e dei sedimenti fino al 90%. Tale impiego è infatti conosciuto proprio come “sistema vetiver”.

La ricerca e lo sviluppo delle applicazioni estensive realizzate in Australia, Cina, Thailandia e altri paesi dimostrano che questa pianta sia estremamente efficace per il trattamento dei suoli e delle acque contaminate, presentando delle ottime capacità di fitoestrazione e fitostabilizzazione e un’elevata tolleranza a diverse tipologie di inquinanti:

- Al, As, Cr, Mn, Cd, Ni, Pb, Cu, Se, Zn, Hg, (Truonge Baker, 1998).
- Capacità di tollerare elevati livelli di erbicidi e pesticidi quali Diuron e Atrazina fino a 2000mg/l ed estrarre DDT.
- Adatta all’allevamento idroponico in vasche per il trattamento di reflui civili, industriali ed agricoli.
- Capacità di estrazione ed eliminazione dei nitrati dagli strati più profondi del terreno.

7.5. Cynara cardunculus spp. L.

Nome comune: cardo selvatico e domestico

Inquadramento botanico: Famiglia *Asteraceae*, Genere *Cynara*, Specie *C. cardunculus spp. L.* Secondo la classificazione del fiore al genere *Cynara* si attribuisce una unica specie il *Cynara cardunculus* (L.), che comprende tre varietà botaniche:

- *Cynara cardunculus sylvestris*: il cardo selvatico, noto sotto il nome di caglio o carduccio, spontaneo nel bacino del Mediterraneo.

- *Cynara cardunculus scolymus*: carciofo coltivato;

- *Cynara cardunculus altilis:* cardo domestico.

Si ritiene che il carciofo ed il cardo domestico derivino entrambi da quello selvatico, in seguito ad un processo di selezione che ha favorito lo sviluppo dell'infiorescenza nel primo e della nervatura mediana delle foglie nel secondo.

Origine e diffusione: Il genere *C. cardunculus* è originario del bacino del Mediterraneo, grazie agli egizi che se ne cominciò la coltivazione. Furono comunque gli arabi che intorno al 1400 lo diffusero prima in Spagna e poi in Italia, forse proprio per questo la parola carciofo deriva dall'arabo "kharshuf". La sua diffusione si

estende a tutta l'area del mediterraneo, in particolare Italia, Spagna, fino alla Francia e nelle regioni del nord Africa.

Descrizione della specie: *C. cardunculus* è una pianta erbacea perenne, sotto il profilo organografico è possibile individuare una parte sotterranea, formata da un fittone principale e da un numero variabile di radici secondarie, fibrose; nonché un rizoma più o meno espanso comprendente gemme sia singole che a gruppi.

Le radici di un anno mantengono la funzione assorbente fino alla primavera inoltrata, dopo di che si ingrossano progressivamente e assumono la funzione di riserva e sostegno, mentre un nuovo sistema radicale avventizio ne prende il posto sotto il profilo fisiologico.

Complessivamente il sistema radicale del cardo è molto sviluppato, e può raggiungere la profondità di oltre un metro permettendo alla pianta di esplorare un ampio volume di terreno.

Sul rizoma sempre più evidente dopo il primo anno, si sviluppano delle gemme che daranno origine ai germogli laterali, detti carducci, che possono svilupparsi fino a formare una nuova pianta. A livello ipogeo la pianta presenta un fusto molto raccorciato e numerose foglie, (oltre 40) alterne, pennatosette e di lunghezza superiore al metro soprattutto per quelle basali. Si caratterizzano per la presenza di un peziolo molto sviluppato ed una carnosa nervatura centrale di colore verde chiaro e ricca di tessuto cribro-vascolare.

La lamina è più o meno profondamente incisa é di forma diversa tra le varie cultivar e all'interno della stessa pianta, sono di colore verde scuro o cinereo sulla lamina superiore, e grigiastro su quella inferiore a causa della tomentosità.

Alla fioritura la pianta presenta uno o più steli fiorali, eretti di altezza variabile da 1,5 m fino a 3 m circa e di 2-4 cm di diametro, munito di numerose ramificazioni, anch'esso tomentoso e con numerose piccole foglie alterne lanceolate.

Ogni ramificazione presenta terminalmente un'infiorescenza detta capolino o calatide, di forma circolare o ovoidale, e avvolta da brattee ellittiche di consistenza coriacea e dal colore variabile dal verde chiaro al violetto più o meno intenso. Il numero dei capolini varia da 10 a 30 dei quali il più grande e precoce si trova sulla

sommità dello stelo principale e gli altri seguono scalarmente quest'ultimo; ciascuno di essi presenta centinaia di fiori (flosculi), ermafroditi , tubulosi, inseriti su di un grosso ricettacolo dapprima carnoso e concavo, poi col procedere della fioritura piatto e legnoso; i flosculi presentano stigmi dai colori molto evidenti, dal bianco-lilla al blu-violetto.

Il frutto è un piccolo achenio di colore scuro grigiastro, la cui disseminazione anemofila è favorita dal calice metamorfosato in un organo di consistenza piumosa molto leggero (pappo). Alla maturazione fisiologica degli acheni i capolini possono raggiungere un peso variabile, a seconda delle dimensioni, da 10 a 120g, il 32% del quale è dato dagli acheni.

Esigenze e tecnica colturale: Questo genere di piante presentano una spiccata adattabilità all'ambiente caldo-arido del mediterraneo, dove è in grado di estrinsecare il pieno potenziale produttivo, che si concretizza in un ciclo autunno-vernino-primaverile coincidente con il periodo in cui si hanno i maggiori apporti idrici naturali.

La pianta completa il ciclo con la maturazione e disseminazione degli acheni in agosto settembre, preceduta dal progressivo essiccamento della parte epigea, e dopo un periodo di stasi estiva riprende la fase vegetativa grazie alle gemme sotterranee rimaste quiescenti (ovuli). La propagazione di questa pianta, sia allo stato naturale che coltivata, avviene vegetativamente grazie alla presenza di gemme dormienti (ovuli), o alle gemme già sviluppate, i carducci.

La riproduzione avviene anche per via sessuata, ossia da seme, ma a causa del forte grado di eterozigosi delle nostre varietà, le piante coltivate, nate da seme avrebbero caratteri completamente diversi ed eterogenei rispetto allo standard varietale. Le esigenze idriche di queste specie, in particolare *C. cardunculus sylvestris* e *altilis* sono soddisfatte da una piovosità autunno-primaverile di 400-500 mm, e le esigenze termiche, non dissimili da quelle del carciofo coltivato, prevedono un optimum per la crescita di 15-22° C, temperature inferiori ai 10° C rallentano lo sviluppo, mentre temperature di -4 -7° C, non solite nelle regioni costiere più meridionali, possono arrecare seri danni. Pur adattandosi ad un ampio range di caratteristiche pedologiche,

vegetando spontaneamente in pieno campo, o in terreni marginali, costieri e ricchi di scheletro estrinseca al massimo le sue potenzialità nei terreni di medio impasto, profondi e privi di scheletro con ph prossimo alla neutralità e buona capacità di ritenzione idrica.

Per contro manifesta una certa sensibilità ai ristagni idrici e una buona tolleranza a variazioni di ph e salinità. La preparazione del terreno, nel caso del cardo domestico, assume rilevanza centrale al fine di assicurare un'emergenza rapida ed uniforme e un buon approfondimento dell'apparato radicale. A tal riguardo risulta utile un'aratura di media profondità, 20-30 cm, seguita da un buon amminutamento del terreno.

La semina può essere effettuata da settembre a ottobre negli ambienti mediterranei (2-4 kg/ha), con seminatrici meccaniche o di precisione, ad una profondità di circa 4 cm e un investimento unitario pari da 1-1,2 piante/m^2 fino a 2,5 piante/m^2 per massimizzare la produzione di biomassa¸ quest'ultima può oscillare a seconda della varietà e di vari fattori, con una media di 14-20 t/ha.

La raccolta di tutta la biomassa secca avviene in estate, a maturazione fisiologica degli acheni, prima della disseminazione utilizzando una barra falciatrice a 5 cm dal suolo, seguita da una rotoimballatrice, o con una macchina combinata con un organo di mietitura a barra alta per la raccolta dei semi ed il contemporaneo sfalcio della biomassa. Infine tra i parassiti di queste piante i più temuti sono sicuramente le arvicole (roditori di campagna) attratti dalle foglie e dai rizomi molto carnosi, tra gli insetti troviamo soprattutto le larve di alcuni lepidotteri.

Utilizzi: Tradizionalmente il cardo domestico rappresenta una coltura ad uso alimentare, coltivata per il consumo dei carducci e parte delle lamine fogliari. Tuttavia diversi contributi hanno messo in luce la possibilità di usare il cardo come biocombustibile e per la produzione di bioenergie, attraverso combustione diretta o pirolisi.

La caratteristica che rende interessante questa coltura è sicuramente l'elevata produzione di biomassa, a fronte di una richiesta relativamente limitata di input. In prove sperimentale effettuate in Sicilia è emerso che la produzione di biomassa del cardo non risulta dissimile da quella del sorgo e del miscanto da biomassa coltivati

nello stesso ambiente e presenta un potere calorifico di poco inferiore a queste due, inoltre la bassa umidità della biomassa rende più agevole le fasi di trasporto e termoconversione.

Gli acheni, infine, per l'alto contenuto in olio (25-30% circa), si caratterizzano per un maggiore potere calorifico (22-23 MJ kg); da essi tramite processo di estrazione a freddo è possibile ottenere un olio destinabile all'alimentazione umana, con qualità intermedie tra l'olio di mais e quello di girasole, o alla produzione di biodiesel.

È in fase d'avvio inoltre un progetto italiano "Matrica", dal nome della società a capo dell'iniziativa, volto alla realizzazione nella città di Porto Torres, in Sardegna, di uno dei più importanti stabilimenti a livello mondiale nella produzione di derivati di oli vegetali; la bio-raffineria prevede un impianto per la produzione di monomeri biodegradabili e un impianto per la produzione di oli lubrificanti biodegradabili, comprendendo dunque bio-intermedi, bio-plastiche, bio-lubrificanti e bio-additivi.

Grazie alle sue ridotte esigenze e perfetto adattamento agli ambienti mediterranei, si presta dunque per essere coltivato come coltura da biomassa in ambienti rustici, e marginali come quelli inutilizzabili a causa delle condizioni di contaminazione del suolo. molti studi hanno messo in evidenza la capacità della varietà *C. cardunculus sylvestris,* ovvero il cardo selvatico, di estrarre vari tipi di metalli pesanti quali Pb, Zn, Cd, As; uno tra questi è quello condotto dall'Università di Fisiologia Vegetale di Barcellona in cui ha mostrato notevole tolleranza e concentrazioni potenzialmente tossiche di As e Cd nei tessuti.

7.6. Festuca arundinacea S.

Nome comune: Festuca

Inquadramento botanico: Famiglia *Poaceae,* Genere *Festuca,* Specie *F. arundinacea S.*

Origine e diffusione: la festuca è una graminacea di origine incerta, si trova spontanea in Europa, Asia temperata e Nord Africa, è stata introdotta in coltura in America settentrionale e meridionale, in Europa e, più recentemente, in Italia.

Descrizione della specie: pianta perenne, cespitosa di taglia ragguardevole fino a 150-160 cm, ha un sistema radicale molto profondo senza rizomi. Gli steli sono eretti, le foglie larghe di colore verde scuro a portamento rigido, ruvide al tatto per la presenza di scaglie silicee, con nervature mediana accentuata. L'infiorescenza è un pannicolo lungo 25-30 cm, verde-violacea, con spighette provviste di 3-10 fiori, semi piuttosto piccoli (1.000 semi = 2,5 g) con rachide a sezione circolare.

Esigenze e tecnica colturale: caratteristica saliente di questa graminacea è l'estrema rusticità che la rende interessante in tutti gli ambienti. Infatti, si adatta benissimo al freddo, alla siccità e a tutti i terreni, compresi quelli acquitrinosi, purché non troppo superficiali. Una volta attecchita il suo sviluppo non è molto rapido, ma dopo il primo anno si trasforma in una coltura molto fitta che può essere ripetutamente

sfalciata. È certamente fra le graminacee più produttive e anche fra le più longeve potendo fornire buone rese per 6-10 anni.

Per contro essa presenta due notevoli difetti: il lento insediamento, che può rendere pressoché improduttivo il primo anno, e la scarsa appetibilità dell'abbondante foraggio che, pur presentando una buona composizione chimica, viene sovente rifiutata dal bestiame oltre lo stadio di spigatura.

Le varietà di *F. arundinacea* a seconda della loro origine, si distinguono in tipi a ciclo autunno-primaverile, che rimangono pressoché verdi in inverno e tipi primaverile-estivo che ingialliscono in inverno ed hanno ripresa vegetativa più tardiva. La preparazione del letto di semina prevede che il terreno sia lavorato finemente in superficie.

Per questo motivo è bene che la festuca segua una coltura che lasci il terreno in buone condizioni di lavorabilità. La scelta dell'epoca di semina sarà in funzione della coltura precedente e dell'andamento climatico della zona, la profondità va da 1,5 ai 2 cm con successiva rullatura per favorire il contatto dei semi con la terra e con dosi di semina di 30-50 kg/ha^{-1}.

Utilizzi: questa specie è molto utilizzata nella realizzazione di tappeti erbosi, in mistura con sementi di altre graminacee, poiché tollera il caldo, la siccità ed esposizioni sia soleggiate che all'ombra. Rimane verde tutto l'anno e resiste a molte malattie e al calpestamento, sopporta molto bene l'usura ed è molto persistente anche in caso di scarsa manutenzione; viene spesso usata anche nei campi di calcio.

In campo agronomico riveste una notevole importanza per la produzione di fieno essendo una specie a rapido essiccamento, per contro per via dell'altezza raggiunta non è facilmente pascolabile oltre a non essere molto appetita agli animali specialmente se in fase di spigatura. La *F. arundinacea* grazie al suo sviluppato apparato radicale svolge un efficace azione di fitostabilizzazione, riducendo la lisciviazione delle sostanze inquinanti e in generale l'erosione del suolo, e mostra delle ottime capacità di iperaccumulo per Pb, Cd, Zn e PCB; come riportato da sperimenti condotti dal Dip. di Biologia dell'Università di Jackson State negli USA, o come l'intervento promosso dall'Università di Cagliari a Montevecchio, in un

suolo contaminato da metalli in un'area mineraria dismessa: in questa occasione la Festuca, rinvenuta spontanea assieme ad altre specie, ha mostrato livelli di accumulo pari a 21.500 mg/kg per il Pb soprattutto nelle radici, e 3.000 mg/ke per lo Zn.

7.7. Helianthus annuus L.

Nome comune: girasole

Inquadramento botanico: Famiglia *Asteraceae*, Genere *Helianthus*, Specie *H. annuus L.*

Origine e diffusione: è una specie originaria dell'America centro-settentrionale, introdotto in Europa intorni al 1500 principalmente come pianta ornamentale. Oggi è coltivata soprattutto in Russia, Ucraina, Spagna e America del sud, principalmente per la produzione di olio; in Italia è presente soprattutto nelle regioni centrali.

Descrizione della specie: il girasole è una pianta erbacea annuale di grande sviluppo; possiede una lunga radice fittonante che può raggiungere i 2 metri di profondità, su cui sono inserite numerose radici laterali. Il fusto può raggiungere notevoli altezze (nei paesi d'origine può superare i 3-4 m), nelle varietà da olio fino a 2 metri circa. Il culmo è eretto, cilindrico e midolloso e solo a maturità si curva nella parte terminale per l'aumento del peso dell'infiorescenza. Sullo stelo sono inserite le foglie, ruvide su entrambe le facce, munite di un lungo picciolo. Il culmo termina con l'infiorescenza o calatide, le cui dimensioni sono molto variabili (in media 10-40 cm di diametro).

Questa infiorescenza è caratterizzata, esternamente, da una corona di fiori sterili entro cui sono inseriti tutti gli altri, più piccoli, fertili, ermafroditi. I fiori schiudono

in maniera scalare, con andamento centripeto. In seguito alla fecondazione si forma un frutto secco indeiscente, detto achenio (inesattamente chiamato seme), di dimensioni e forma variabili. L'olio contenuto nell'achenio rappresenta in media il 40-50% del peso del seme.

Caratteristico del Girasole è l'eliotropismo, cioè il fatto di seguire il movimento della luce durante il giorno; tale fenomeno, che riguarda l'infiorescenza durante la fase di sviluppo e le giovani foglie, cessa al sopraggiungere della fioritura, tanto che da questo momento in poi la maggior parte dei fiori rimane rivolta verso est sud-est.

Esigenze e tecnica colturale: sotto il profilo pedologico non ha particolari esigenze, da evitare i terreni sciolti e quelli pesanti, il substrato preferito è di medio impasto, profondo per garantire una buona capacità di ritenzione idrica sia calcareo che siliceo con pH neutro o sub-acido e soprattutto di elementi nutrizionali quali N e K, più basse le esigenze per il P.

Pur essendo caratterizzata da un consumo idrico elevato, l'irrigazione non è necessaria in quanto in caso di carenza idrica, riesce a sfruttare l'umidità degli strati profondi grazie al notevole sviluppo capillare dell'apparato radicale, è infatti una tipica pianta da rinnovo adatta alla coltura asciutta però; nelle regioni meridionali, troppo aride, il girasole può essere coltivato solo con il sussidio dell'irrigazione soprattutto nelle fasi di germinazione e fioritura (possono essere soddisfatte con interventi di soccorso pari a 100-200m^3 ha^{-1} nelle prime fasi e interventi di maggiore entità nella fase di fioritura, 300-400 m^3 ha^{-1}). Il suo optimum termico per la fase vegetativa è di 18°C e tollera sia le basse che le alte temperature.

Ha un ciclo colturale primaverile-estivo breve (110-150 giorni) e lascia il terreno in buone condizioni di fertilità nel caso di interramento dei residui colturali. Una volta sviluppata, ha una notevole capacità di soffocare le infestanti. Al centro-sud è possibile impiegare il girasole come coltura intercalare (con irrigazione). Vista la limitata capacità di penetrazione delle radici, è necessaria una aratura (in genere in estate) a notevole profondità (50-60 cm) o una lavorazione a due strati. Il terreno nei primi 6-8 cm dovrà essere ben amminutato.

In Italia la semina viene effettuata nella prima metà di aprile al Nord, verso la fine di marzo al Centro e non oltre la metà di marzo al Sud, ma in questo ambiente per sopperire alle carenze idriche estive, potrebbe essere coltivato più convenientemente ai fini fitoestrattivi in ciclo autunno-vernino. La semina viene fatta, a seconda del prodotto che si vuole ottenere, in file distanti dai 45 ai 70 cm, con seminatrice di precisione, ponendo dalle 5 alle 9 piante/m^2.

La raccolta avviene nel periodo estivo quando la calatide vira al bruno e le foglie basali seccano utilizzando le mietitrebbiatrici da frumento opportunamente modificate.

Tra le maggiori avversità vi sono la grandine, che può causare gravi lacerazioni agli organi vegetativi e le siccità prolungate al sud. È inoltre soggetta a varie micosi come la peronospora, l'oidio, i marciumi e la ruggine; gli insetti patogeni sono soprattutto gli elateridi, collemboli e lepidotteri. Infine gli uccelli specialmente nella fase di maturazione possono arrecare danni consistenti alle infiorescenze. Quest'ultimo aspetto è da tenere fortemente in considerazione negli interventi di bonifica in quanto il rischio che i contaminanti entrino nella catena alimentare è elevato.

Utilizzi: la coltivazione della pianta del girasole è volta soprattutto alla produzione dei semi, dei quali l'utilizzo più importante è sicuramente l'estrazione dell'olio, costituente circa il 40% del peso degli acheni. Esso viene impiegato prevalentemente in ambito alimentare, per la cottura dei cibi o la loro preparazione, come olio per motori e macchinari sfruttando le sue proprietà di viscosità; oppure i semi tal quali possono essere consumati come snak tostati soprattutto in America e Cina, o come mangime per uccelli e roditori. Più attuale e sempre più promettente l'utilizzo di questa coltura per la produzione di biodiesel a seguito del processo di trans-esterificazione dell'olio contenuto nei suoi semi. Nell'ambito della phytoremediation varie sperimentazioni on-site, su coltura idroponica e in pieno campo hanno confermato l'elevata capacità di fitoestrazione e rizofiltrazione di questa pianta nei confronti di metalli pesanti quali Zn, Cu, Cd, Cr, Pb, Hg, idrocarburi e soprattutto radionuclidi quali stronzio, cesio134 e 137 e uranio fino a concentrazioni di 15.000 mg/kg S.S. (McIntyre 2003).

Tra queste vi è quella effettuata da alcuni ricercatori della Phytotech in U.S.A., i quali hanno condotto esperimenti su piccola scala utilizzando piante di *Helianthus annuus* per il trattamento di acque sotterranee e di processo contenenti uranio, nei pressi di Ashtabula (Ohio); la concentrazione di inquinante nelle acque è stata ridotta da alcune centinaia di μg/l a valori inferiori a 20 μg/l.

La stessa Phytotech ha poi utilizzato i girasoli con successo per la rimozione di radionuclidi dalle acque di una palude nei pressi dell'impianto nucleare di Chernobyl (Ucraina).

Più recente è invece la notizia proveniente da Tokyo riportata dall'ANSA, secondo cui un gruppo di ricercatori nipponici seguendo l'esempio di Cernobyl, si apprestano alla coltivazione dei girasoli per ripulire il suolo contaminato nei pressi della centrale nucleare di Fukushima.

Il progetto prevede la coltivazione dei girasoli non soltanto intorno alla centrale dove la contaminazione è certamente maggiore, ma anche nei giardini delle scuole situate nel raggio di 30 km dall'impianto.

Tuttavia il team deve affrontare il problema di come smaltire la biomassa contaminata; al momento la soluzione più efficace appare il trattamento delle piante con batteri utilizzati per lo smaltimento dei rifiuti che ridurrebbero il volume all'1% di quello originale. I resti del processo sarebbero poi gestiti alla stessa stregua dei rifiuti nucleari.

7.8. Ricinus communis L.

Nome comune: ricino

Inquadramento botanico: Famiglia *Euphorbiaceae*, Genere *Ricinus*, Specie *R. communis L.*

Origine e diffusione: è una pianta originaria dell'Africa e dell'Asia tropicale, addomesticata a partire dal VI millennio a.C., introdotta in Europa nel periodo pre-romano. Oggi è coltivata in tutto il mondo, soprattutto Asia e America del sud (Cina, India e Brasile) per l'elevato contenuto in olio dei suoi semi che trovano applicazione in campo farmaceutico ed industriale.

Descrizione della specie: la specie R. communis è l'unica del suo genere; è una pianta arborescente annuale o perenne a seconda delle condizioni climatiche del territorio in cui si trova, morfologicamente presenta un apparato radicale formato da un grosso fittone che si sviluppa in profondità e da radici laterali superficiali. Il fusto (verde o porpora più o meno intenso), eretto e cavo, più o meno ramificato, e alto da 60 cm a oltre 5 metri. Le foglie sono alterne, di colore variabile dal verde al rosso, molto grandi e di forma palmata-lobata con 5-11 lobi ovali o acuti, talvolta dentellate; presentano a volte nervature rosso cupo. È una pianta monoica, con fiori disposti a grappoli, sulla parte basale sono collocati quelli maschili, mentre quelli femminili si trovano sulla parte apicale, la fioritura avviene in estate e la

fecondazione allogama dà origine a capsule triloculari che, a seconda della varietà, possono essere deiscenti o indeiscenti e spinose o lisce. La maturazione dei semi non è simultanea bensì avviene scalarmente.

La loro forma è ovoidale compressa, di circa 1 cm, con una delle estremità più arrotondata e con l'altra fornita di una protuberanza detta caruncola, la parte ventrale presenta inoltre una linea sporgente. Hanno una colorazione lucente marmorizzata di colore rosso bruno con delle striature più scure. La totalità della pianta è tossica a causa della presenza di una glicoproteina: la ricina che ha la massima concentrazione nello spermoderma dei semi, e sempre in essi è contenuto un olio, (40- 60 % del peso), costituito da acido ricinoleico, che conferisce le proprietà purgative.

Esigenze e tecnica colturale: essendo una pianta di origine tropicale, il ricino ha bisogno per il suo sviluppo vegetativo, di temperature piuttosto elevate, il suo optimum si aggira infatti tra i 25 e i 30° C. Benché sia considerata una pianta resistente alla siccità, tanto che in Sicilia è possibile rinvenirla spontanea e prosperosa in molti areali, al fine di ottenere una produzione economicamente valida richiede non meno di 600-700 mm di pioggia, anche se, con alcune varietà, sono sufficienti valori inferiori.

Pur adattandosi a diversi terreni come quelli ricchi di scheletro o costieri, le migliori produzioni si ottengono in quelli limo-sabbiosi, ben drenati e ricchi di sostanza organica; predilige esposizioni dirette al sole o a mezz'ombra e resiste bene anche a un discreto grado di salinità.

L'intenso lavoro di miglioramento genetico ha riguardato in particolare l'adattamento pedoclimatico, l'altezza del fusto, la produttività, la deiscenza delle capsule, il peso e il tenore in olio. Dal punto di vista nutrizionale è molto esigente nei confronti del potassio e dell'azoto.

Occupa nell'avvicendamento la posizione di una coltura da rinnovo, necessita di una prima aratura profonda autunnale, con interramento di letame e dei concimi fosfatici e potassici, di una aratura invernale e di una successiva erpicatura per la preparazione di un buon letto di semina. Quest'ultima avviene in aprile-maggio, a file distanti 70-80 cm e deponendo il seme a 20-25 cm sulla fila (6-7 piante a metro quadrato),

impiegando 12-16 kg/ha di semente. l'azoto viene distribuito in parte in presemina e in parte al momento della prima sarchiatura. Come già detto, il ricino si avvantaggia notevolmente di interventi irrigui, specie subito dopo la semina, per favorire la germinazione.

Nelle prime fasi del ciclo è sensibile alle infestanti, che vengono controllate con un diserbo chimico in preemergenza e successive sarchiature, a seconda delle necessità; a volte si esegue la cimatura per migliorare la produzione. La raccolta delle capsule comincia in agosto per le varietà precoci, fino ad ottobre per le più tardive, inizia quando le capsule presentano un colore bruno e gli aculei diventano consistenti e fragili. La resa in semi sgusciati oscilla intorno ai 15-16 quintali per ettaro, e la biomassa, soprattutto costituita dagli steli circa 30 t/ha.

Questa pianta non ha molti parassiti vegetali (principalmente un lepidottero: Dichocrocis punctiferalis) dovuto soprattutto alla tossicità dei suoi organi vegetativi. Tale caratteristica non la rende appetibile agli insetti evitando così, l'ingresso di contaminanti nella catena alimentare in caso di interventi di phytoremediation. I danni maggiori alla coltura sono per lo più determinati da cause meteoriche, in particolare brinate e gelate tardive, che sono letali nelle prime fasi di vegetazione della pianta e gravissimi danni possono essere causati dalla grandine durante la fioritura.

Utilizzi: di questa pianta sia le foglie che gli steli vengono utilizzati come combustibile o per fornire fibre tessili grossolane; ma viene coltivata principalmente per la produzione dei semi da cui estrarre il pregiato olio. Da diversi secoli l'olio di ricino viene infatti utilizzato in farmacia per varie affezioni e specialmente come purga. Per la sua viscosità costante, il basso punto di congelamento e l'assenza di residui, trova vasto impiego nella lubrificazione dei motori ad alta frequenza e a forte compressione. Inoltre rispetto agli altri oli minerali, presenta un maggiore potere lubrificante e un maggiore punto di infiammabilità. Molti sono gli usi industriali: la preparazione di grassi, nella concia del cuoio, sapone da toilette, pomate, nell'industria della ceralacca e delle vernici, ecc.

I panelli di ricino residui dal processo di estrazione sono usati come concimi organici ad elevato contenuto di azoto, ma per la presenza della ricinina, insolubile e tossica sono inadatti come mangimi.

Come accennato precedentemente gli organi vegetativi, ossia fusto e foglie ad eccezione dei semi, possono essere convertiti in energia termo-elettrica attraverso i vari processi termo-chimici, come la gasificazione, combustione o pirolisi; mentre per i semi, come già avviene per le altre colture oleaginose da biomassa (soia, colza, girasole ecc.), grazie all'elevato contenuto in olio, possono essere trasformati tramite processo di trans-esterificazione in biodiesel.

Con riferimento alle capacità di phytoremediation, uno studio pilota effettuato dalla Scuola di Ingegneria e Scienze Ambientali, Università di Shanghai, (Rivista di Scienze Agroambientali 2004-2005) ha dimostrato per questa pianta la tolleranza al Cd fino a concentrazioni di 400 mg/kg ed un maggior accumulo per tale elemento a carico delle radici, inferiore per steli e foglie.

Un altro studio, condotto presso il Centro Sperimentale dell'Istituto Agronomico di Campinas, (Brasile 2004) ha testato la tolleranza e l'accumulo di grandi quantità di Pb soprattutto nelle radici delle piante coltivate in serra in coltura idroponica. Variazioni negative nella fotosintesi e nella crescita sono state molto ridotte, raggiungendo una significatività statistica in piante cresciute con 400 mmol/L di Pb.

7.9. Altre specie

In Europa le colture erbacee da biomassa trovano spazio soprattutto nelle aree temperate a causa delle loro esigenze termiche e idriche; la coltivazione di queste specie negli ambienti mediterranee pone gravi limitazioni soprattutto a causa della ridotta disponibilità idrica di questi ambienti durante la stagione estiva che coincide con il periodo di massimo sviluppo di molte di loro. Alla luce di ciò, si rende necessario individuare colture da biomassa con elevata tolleranza alle alte temperature ed efficienza di utilizzazione dell'acqua.

L'ambiente mediterraneo caldo-arido è ricco di specie spontanee ligno-cellulosiche ad elevata persistenza, e di potenziale interesse a tali fini. Nel territorio siciliano sono state individuate diverse Poaceae poliennali che potrebbero essere coltivate in condizioni di input colturali ridotti e in ambienti dove non è sostenibile la pratica irrigua.

Queste specie grazie alle caratteristiche appena citate, potrebbero dunque essere convenientemente utilizzate per interventi di phytoremediation, qualora venissero individuate e riconosciute eventuali capacità di bioaccumulo. Di conseguenza sarà indispensabile effettuare delle prove sperimentali che ne attestino la loro efficienza anche in questo genere di applicazioni.

Il Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agrarie e Alimentari (DISPA) dell'Università degli Studi di Catania, nell'ambito della sua attività di ricerca sulle colture energetiche ne ha individuato e raccolto alcune, appartenenti alla famiglia delle *Poaceae,* a carattere perennante e cespitose: *Oryzopsis miliacea* (L.), *Cymbopogon hirtus (L.), Sorghum halepense* (L.), tutte e tre con una produzione media di biomassa secca pari a 2,7 t/ha, e *Saccharum spontaneum* (L.) ssp. *Aegyptiacum* con rese significativamente superiori pari a 9,6 t/ha*, Ampelodesmos mauritanicus* (P.), *Lygeum spartum* (L.) e *Phragmites australis* (C.), che sembrano presentare le caratteristiche ricercate (Copani, 2009).

- ***Cymbopogon hirtus* (L.)**

Nome comune: Barboncino mediterraneo

Inquadramento botanico: Famiglia *Poaceae,* Genere *Cymbopogon* Spreng*.,* Specie *Cymbopogon hirtus* L.

Descrizione: questa specie è diffusa in Liguria, Italia centrale, Sicilia, Sardegna, Corsica ed Isole minori, predilige macchie e garighe, rupi soleggiate, terreni incolti ed aridi. Habitus cespuglioso (30-60 cm diametro), culmi eretti, gracili. Foglia con lamina stretta di 2-4 mm; ligula breve (1 mm), portante un ciuffo di lunghi peli. Infiorescenza formata da spighe appaiate lunghe 3-4 cm, ciascuna coppia portata da un peduncolo comune inserito all'ascella di foglie cauline spatiformi, rigonfie, larghe 5-6 mm, più o meno violacee arrossate; glume 6 mm, lemma lineare con resta lunga 2 cm circa (Pignatti, 1982).

- ***Oryzopsis miliacea* L.**

Nome comune: miglio

Inquadramento botanico: Famiglia *Poaceae*, Genere: *Oryzopsis* Michx., Specie *Oryzopsis miliacea* L.

Descrizione: è diffusa in Liguria, Toscana, attorno al Garda, nel triestino, Sardegna, Corsica, Sicilia ed in molte Isole minori. Predilige pendii umidi e zone ombreggiate, alvei e siepi.

Pianta cespugliosa con numerosi culmi eretti o ascendenti, assai ramosi, quasi completamente avvolti dalle guaine. I culmi sono lignificati alla base, abbastanza induriti, nodosi con numerosi rami laterali.

Nelle zone più calde sono spesso svernanti, e per tutti questi caratteri rappresentano un'interessante convergenza con la struttura bambusoide, caratteristica di molte graminacee tropicali e subtropicali, che rappresentano per l'ambiente mediterraneo una forma insolita, classificabile come fanerofitica.

Foglia con lamina larga fino a 7 mm, pubescente alla base, solcata, scabra e più o meno convoluta; ligula ottusa, 1 mm (nelle foglie superiori fino a 3 mm). Pannocchia ampia, ricca, lunga 10-30 cm; rami infiorescenza in verticilli, generalmente unilaterali; spighette uniflore, lungamente peduncolate, glume paglierine 3-3,5 mm,

lemma 2,5 mm, con resta capillare di 3-5 mm, inserita ad un quarto dall'apice, spesso precocemente caduca (Pignatti, 1982).

- ***Sorghum halepense* L.**

Nome comune: sorgo selvatico, sorghetto, sagginella, melghetta, melgastro, canestrello.

Inquadramento botanico: Famiglia *Poaceae*, Genere: *Sorghum Moench*, Specie: *Sorghum halepense* L.

Descrizione: è presente in tutto il territorio del Mediterraneo, predilige terreni sarchiati, incolti sabbiosi umidi. Specie con rizomi sotterranei orizzontali, culmi eretti (50-300 cm), fogliosi fino all'infiorescenza. Foglie con lamina larga 1-2 cm e 20-90 cm lunga, sul bordo ruvida, tagliente per aculei rivolti verso l'alto; ligula 2 mm con un pennello di peli bianchi. Pannocchia ampia, aperta con rami patenti; spighette 4-6 mm, appaiate, l'una sessile con un fiore ermafrodita, l'altra peduncolata con un fiore maschile o abortivo; glume pubescenti in basso, lucide, mentre quelle delle spighette peduncolate bruno-rossastre; lemma mutico o con resta di 5-15 cm (Pignatti, 1982).

- ***Saccharum spontaneum*** **L. ssp. a*egyptiacum***

Nome comune: Canna d'Egitto

Inquadramento botanico: Famiglia *Poaceae*, Genere *Saccharum* L., Specie *Saccharum spontaneum* L., Subspecie *Saccharum spontaneum* L. ssp. a*egyptiacum*.

Descrizione: la canna d'Egitto è una pianta cespugliosa, perenne, rizomatosa con culmi eretti (2-4 m), robusti, pieni ed internodi solidi, molto simile nell'aspetto esteriore al Miscanto. Possiede foglie pelose sulla guaina, con lamina glabra di colore verdastro tendente al bianco-argentato, tagliente ai margini (50-200 cm), scabra, larga 1-3 cm, ma generalmente convoluta. Ligula bi-auricolata e pelosa. Pannocchia ampia, a contorno lanceolato (20-50 cm), lanosa con spighette 4-6 mm avvolte da peli di 10-12 mm; racemi 3-15 cm con rachide fragile ai nodi, glume acuminate, cigliate alla base; spighette 4-6 cm, appaiate (una sessile e l'altra peduncolata), avvolte da peli di 10-12 mm; glume acuminate, cigliate alla base (Pignatti, 1982).

Altre specie di potenziale interesse:

***Ampelodesmos mauritanicus* P.**

***Phragmites australis* C.**

***Lygeum spartum* L.**

8. UTILIZZI DELLA BIOMASSA CONTAMINATA

Seppur molti siano stati i progressi e altrettanto rassicuranti le prospettive, il destino e il riutilizzo delle biomasse derivate dal processo di fitorimedio, sono ancora in fase di studio e perfezionamento, dovuto soprattutto alle diverse competenze tecnico-scientifiche che ciò coinvolge.

Per il riciclo di questi scarti infatti, sia la biomassa che i contaminanti in essa presenti, bisogna affrontare problemi di tipo logistico ed economico oltre al più grande dilemma che sin dall'inizio attanaglia la phytoremediation e legato ad uno smaltimento sostenibile della biomassa con l'ulteriore abbattimento delle emissioni che ne derivano.

L'obiettivo che si vuol raggiungere dunque, è quello di riciclare in maniera "pulita" questi scarti ottenendo da essi derivati variamente impiegabili: dalle bio-plastiche ai coloranti, dalla trasformazione delle fibre alla produzione di materiali per la bio-edilizia e la produzione di biocombustibili, rendendo economicamente sostenibile l'intero processo e dando un fine ultimo ancor più "nobile" all'intervento di phytobonifica.

L'estrazione dei metalli dalle colture, può avvenire tramite il processo dell'estrazione liquida, mediante l'impiego di sostanze chelanti e in ambiente acido (pH 4.5), oppure tramite i vari meccanismi di combustione in seguito ai quali viene eliminata tutta la sostanza organica, lasciando intatti i metalli assorbiti dalla coltura sotto forma di ossidi per un eventuale riciclo degli stessi, qualora economicamente conveniente.

Laddove ciò non sia possibile, le ceneri possono essere incorporate in conglomerati cementizi o altri materiali non soggetti a degradazione, rendendo così inerti tali sostanze; e conferite in discarica, con il vantaggio di un ridotto volume rispetto alla biomassa tal quale (Kumar et al., 1995; Mosca et al., 2004) oppure impiegati più convenientemente nell'edilizia, o per opere di riempimento del manto stradale.

8.1. Bioraffinerie

L'attenzione del mondo politico, agricolo e imprenditoriale si è concentrata finora quasi esclusivamente sull'uso energetico delle colture agricole sia nella produzione di energia elettrica che di biocombustibili, alimentando un movimento pendolare di grandi attese e grandi scetticismi e relegando in un angolo le grandi potenzialità dei prodotti di origine vegetale sia come materie prime che come composti ausiliari alla produzione industriale.

A partire dagli anni novanta si è andato lentamente affermando il concetto di un'agricoltura per usi non alimentari, volta cioè alla produzione di materie prime e ausiliari per usi industriali, come alternativa ecologica ai prodotti di origine petrolchimica.

Questa nuova alternativa, la **chimica verde**, prevede il passaggio da un sistema economico basato esclusivamente sulla petrolchimica ad una scelta tecnologica basata su di un crescente utilizzo sia come materie prime che ausiliari, di prodotti vegetali che per loro natura sono rinnovabili, biodegradabili, con positivo bilancio sulla produzione di CO_2 ed in generale a minore tossicità.

Il concetto di bioraffineria, a pari merito con quello di chimica verde, tende a superare il limite di una destinazione puramente energetica delle colture non alimentari, proponendo un impiego potenzialmente integrale della biomassa vegetale come base per la produzione di molecole chimiche a ridotto impatto ambientale come alternativa ai prodotti di origine petrolchimica, utilizzando terreni marginali che dunque non saranno sottratti all'agricoltura per uso alimentare e convertendo gli stessi impianti per la raffinazione del petrolio.

Sono sistemi che integrano processi di conversione della biomassa di natura chimica, fisica o microbiologica al fine di ottenere prodotti energetici, materiali e sostanze chimiche ad alto valore aggiunto.

Le bioraffinerie sono state identificate come la via più completa e promettente per la creazione di un'industria basata su prodotti derivati da materiali di

origine biologica in grado di valorizzare, attraverso la produzione di molteplici composti, le diverse componenti chimiche della biomassa.

L'obiettivo è quello di utilizzare la parte più "nobile" della biomassa (amido, olio, cellulosa, proteine e componenti minori) per la produzione di composti chimici ad elevato valore aggiunto per l'industria (plastiche, lubrificanti, solventi, fibre, coloranti, fitofarmaci, ecc.) o di molecole chimiche (glicerina, acido lattico, ac. propionico, ac. levulinico, ac. gallico, ecc.) per successive trasformazioni chimico fisiche ed enzimatiche e/o successive sintesi organiche. La biomassa residua da questi processi, oscillante orientativamente tra il 10% e il 40% della biomassa iniziale, può essere utilizzata per la produzione energetica necessaria per il funzionamento dell'impianto stesso e se in eccedenza può essere immessa sul mercato sotto forma di energia elettrica o calore.

Dalla biomassa derivante dal processo di phytoremediation dunque, una volta depurate delle sostanze nocive, si può ottenere attraverso vari processi meccanici, fisici e chimici una vasta gamma di materiali e/o composti riciclando in tal modo ogni sua componente.

8.1.1. Lignina, cellulosa ed emicellulosa

La lignina è tra le sostanze più diffuse in natura, a differenza della cellulosa ha una struttura amorfa costituita da gruppi benzenici.

È ottenuta come sottoprodotto nei processi per la preparazione delle paste di legno, un tempo questo sotto prodotto veniva utilizzato come combustibile mentre oggi, seppur in minima parte, vi è la tendenza a recuperarlo come ligninsolfonati (mediante solfonazione con solfito di sodio a 150-200° C o mediante fometilazione) ed utilizzarlo per l'ottenimento di altri derivati.

I ligninsolfonati trovano applicazione come tensioattivi, agenti disperdenti, sequestranti, umettanti, stabilizzanti, nel campo degli adesivi, dei coloranti, nelle industrie del cemento e del cartone.

Dai processi di trasformazione dei materiali lignocellulosici è possibile ottenere quantitativi importanti di acido acetico e formico, oggi quasi esclusivamente preparati per via sintetica e con costi nettamente superiori. Mediante estrazione con alcali è possibile separare l'emicellulosa e la cellulosa dai materiali legnosi.

La cellulosa è un polimero del D-glucosio con una struttura cristallina ben definita ed il costituente principale della parte fibrosa delle piante (40- 60%).

Attraverso la separazione della cellulosa dalla lignina e i successivi processi meccanici, semi-chimici e chimici è possibile ottenere una sorta di "pasta" più o meno pura impiegata per la produzione di carta e cartoni e, allo stato puro, per la produzione di fibre artificiali (rayon e acetato di cellulosa) e di altri derivati polimerici (cellofan, eteri ed esteri cellulosici).

Un altro impiego potenzialmente interessante riguarda la preparazione di glucosio, e la separazione degli zuccheri per destinarli a processi fermentativi.

L'emicellulosa infine, è anch'essa un polisaccaride, scarsamente solubile ed associato alla cellulosa, ma che a differenza di quest'ultima è costituita non soltanto da glucosio, ma da zuccheri differenti; insieme cellulosa ed emicellulosa costituiscono il più abbondante materiale rinnovabile disponibile.

A grandi linee si può dire che le emicellulose tal quali vengono utilizzare per modificare le proprietà dell'acqua, come la viscosità, la tensione superficiale e la tendenza a gelificare.

Trovano impiego nella stabilizzazione di schiume, emulsioni, di gel e nella lubrificazione. Non sono tossiche e possono essere utilizzate per modificare le proprietà di cibi e bevande; altre applicazioni si hanno nel settore cartario per modificare le proprietà della carta, come additivo per l'inchiostro e come materie prime per la produzione di molte sostanze chimiche come il furfurolo e gli acidi gliconici e formico.

8.1.2. Oleoresine e gomme

Gli essudati prodotti dalle piante hanno caratteristiche fisiche e chimiche tra loro differenti; possono pertanto essere suddivisi in due grandi categorie: essudati idrofilici o gomme, costituiti da polisaccaridi solubili in acqua con formazione di soluzioni viscose (gomma arabica), ed essudati idrofobici.

Quest'ultimi possono suddividersi in resine, oleoresine e balsami. I primi sono essudati solidi traslucidi costituiti da idrocarburi terpenici (limonene, terpinene, cimene ecc.), le oleoresine sono costituite da resine disciolte in oli essenziali, i balsami invece, sono essudati liquidi come le oleoresine ma differiscono da quest'ultime per la presenza di notevoli quantità di acidi aromatici (benzoico, cinnamico ecc.). Un'altro particolare tipo di essudato sono i latici, ossia un'emulsione lattiginosa di resine ed idrocarburi.

Tali composti sono ottenibili oltre che per essudazione di legni resinosi, dalla lavorazione del legno per ottenere la cellulosa, tramite estrazione con solventi o distillazione. In molte applicazioni le resine e gli oli naturali hanno prestazioni decisamente superiori a quelle dei prodotti di sintesi.

I principali impieghi delle resine riguardano la produzione di lacche, vernici, rivestimenti idrofobici, profumi, aromi e recentemente paste per saldature; è inoltre possibile ottenere ulteriori derivati quali gomme, lubrificanti, materiali peciosi, insetticidi, acqua ragia e oli per applicazioni speciali.

Dall'altra categoria di essudati delle piante, quelli idrofilici, costituiti anch'essi da polisaccaridi è possibile ottenere un ampio gruppo di sostanze chimiche simili ma altrettanto peculiari. Si tratta di sostanze che hanno la caratteristica di sciogliersi in acqua con formazione di soluzioni viscose o con elevata capacità adesiva; ossia le gomme e le colle o gelatine.

8.1.3. Coloranti

Delle migliaia tonalità di coloranti di origine vegetale esistenti solo pochi hanno raggiunto un'importanza commerciale, a causa del loro costo o del loro utilizzo limitato a settori particolari. Si può stimare che i coloranti naturali costituiscano soltanto il 10% circa della produzione mondiale.

La supremazia spetta ai coloranti di sintesi, di certo più economici e facilmente preparabili in grandi quantità, ma come appurato da ricerche di laboratorio, con effetti teratogeni, mutageni o cancerogeni e per questo sostituiti per legge, da quelli di origine naturale, nelle industrie alimentari, cosmetiche e farmaceutiche.

Possiamo distinguere diverse famiglie o gruppi di coloranti che differiscono soprattutto per le caratteristiche chimiche: ***coloranti carotenoidi***, prendono il nome dalla sostanza dalla quale derivano, il carotene, ampiamente diffusa nel regno vegetale e animale.

I carotenoidi sono contenuti nei cromoplasti, sotto forma di cristalli o goccioline lipidiche, ed anche nei cloroplasti delle cellule vegetali, il loro colore va dal giallo al rosso ed è ad essi che si deve la colorazione di fiori, frutti e foglie dalla quali vengono estratti con acqua, dopo macerazione, o con olio. ***Coloranti chinonici***, prodotti da composti organici formalmente derivati da composti aromatici (ad esempio benzene e naftalene).

Tra questi riveste maggior interesse l'alizarina, un colorante rosso, derivato dall'antrochinone, e già noto agli antichi egizi, e due coloranti derivati dal naftochinone, lo juglone di colore variabile dal giallo al bruno ed il lawsone arancione intenso.

Coloranti flavonoidi e antociani; molti sono gialli ed hanno la struttura base del flavone, e sono presenti nelle piante come glucosidi o esteri dell'acido tannico. Ad esempio dalla *quercina,* ricavata dalla corteccia della quercia è possibile estrarre tramite soluzione acquosa di ammoniaca un colorante detto "flavinia rossa", utilizzato per colorare lana e seta con varie tonalità; mentre per estrazione con vapore d'acqua sotto pressione si ottiene la "flavnia gialla".

Le antocianine, presenti come glucosidi insolubili, impartiscono ai vegetai caratteristiche colorazioni rosse, viola e blu e la capacità inoltre di variare la colorazione a seconda del ph.

Si ottengono per spremitura o estrazione con soluzioni acquose leggermente acide da bacche colorate, o dalle foglie della vite dopo il periodo della vendemmia.

Altri coloranti possono poi essere ottenuti da altre sostanze di origine vegetale: sicuramente quello ottenuto dalla clorofilla, in particolare un colorante verde azzurro per la clorofilla *a*, ed uno giallo verde per la clorofilla b; la *betanina* contenuta ad esempio nelle radici delle barbabietole da cui si ricava un colorante rosso per l'industria alimentare, la *curcumina* di colore giallo, ricavata dalla curcuma indiana e tantissimi altri.

8.1.4. Amido e zuccheri

L'amido è un polisaccaride, polimero del glucosio, si trova soprattutto nei semi, nei frutti e nei tuberi degli organismi vegetali dove riveste una funzione energetica.

I settori industriali maggiormente interessati al suo utilizzo sono: quello cartario, farmaceutico, tessile, della gomma, quello alimentare per la produzione di addensanti e soprattutto delle materie plastiche per la preparazione di film e manufatti biodegradabili.

Quest'ampia varietà d'uso è giustificata dalle diverse caratteristiche chimiche e fisiche degli amidi modificati per rispondere a particolari esigenze come la resistenza al surriscaldamento o al raffreddamento eccessivo, o la stabilità in ambiente acido. Altre importanti applicazioni, sviluppate in particolare negli USA riguardano la preparazione di zuccheri ed etanolo.

Per quanto riguarda i principali zuccheri, mono- e disaccaridi, estraibili dalle componenti vegetali ricordiamo: il *D-glucosio, D-fruttosio, D-L galattosio,* il *saccarosio*, il *lattosio* e il *maltosio;* ottenibili soprattutto dall'amido, dalla cellulosa ed emicellulosa. Trovano applicazioni nell'industria alimentare e per la preparazione di substrati di fermentazione e alcuni derivati chimici (esteri, polialcooli, eteri).

8.2. Produzione di biocombustibili

Analogamente a quanto avviene per la produzione di energia, l'utilizzo della biomassa è soprattutto rivolto alla produzione di biocarburanti che, già negli ultimi anni seppur lentamente, stanno sostituendo i carburanti derivati dal petrolio; rappresentando sin ora la più valida alternativa una volta che questi ultimi si saranno esauriti.

8.2.1. Biodiesel

Il biodiesel è un biocombustibile ottenuto da fonti rinnovabili quali oli vegetali (dai semi delle oleaginose come colza, soia, girasole, ricino) e grassi animali, analogo al gasolio derivato dal petrolio.

La trasformazione degli oli vegetali in biodiesel avviene attraverso un processo chimico di "trans-esterificazione", che comporta la rottura delle molecole dei trigliceridi per mezzo di un catalizzatore alcoolico (metanolo, etanolo), convertendo l'olio base nell'estere desiderato.

Grazie all'ausilio di tecnologie che, operano in condizione di basse temperature e pressione si ottengono due prodotti: il biodiesel e la glicerina, un prodotto secondario che si presta a vari usi soprattutto nella cosmesi o nella produzione di lubrificanti.

L'eco-carburante ottenuto può essere utilizzato puro, nei motori diesel di nuova generazione senza alcun accorgimento, per i motori di vecchia concezione esso può essere utilizzato in miscela al gasolio fino al 30 – 40% senza alcun accorgimento, o puro, apportando delle piccole modifiche al circuito di iniezione ed alle guarnizioni in gomma.

In confronto al gasolio, il biodiesel annovera numerosi vantaggi soprattutto a livello ambientale: non contribuisce all'effetto serra poiché restituisce all'aria solo la quantità di anidride carbonica sottratta all'atmosfera durante il ciclo della coltura, riducendo quindi i rischi alla salute connessi all'inquinamento atmosferico; riduce le emissioni di monossido di carbonio del 35% e di idrocarburi incombusti del 20%, non contiene sostanze pericolosissime per la salute come gli idrocarburi aromatici (benzene, toluene e analoghi) per cui non è tossico, è biodegradabile nel giro di pochi giorni, e inoltre mescolato col gasolio ne triplica la sua degradabilità.

È sicuro da trasportare e maneggiare non presentando pericolo di autocombustione e può essere stoccato e pompato con le stesse modalità e attrezzature utilizzate per il diesel.

8.2.2. Biogas

La digestione anaerobica è un processo di conversione di tipo biochimico che avviene in assenza di ossigeno, ad opera di microorganismi per l'appunto anaerobi, che degradano le sostanze organiche complesse quali lipidi, glucidi, proteine contenute nei vegetali, ma allo stesso modo anche i sottoprodotti di origine animale, le deiezioni, i reflui urbani ecc.

Dalla loro attività di degradazione viene prodotto un biogas costituito per il 50 – 70% da metano, e per la restante parte soprattutto CO_2.

Il biogas così prodotto viene raccolto, essiccato, compresso ed immagazzinato potendolo utilizzare per alimentare caldaie a gas per produrre calore, magari accoppiate a turbine per la produzione di energia elettrica, o utilizzato per alimentare motori a gas.

Al termine del processo di fermentazione inoltre, si conservano pressoché integri i principali elementi nutritivi (azoto, fosforo e potassio) già presenti nella materia prima, l'effluente così prodotto risulta essere un'ottimo fertilizzante una volta estratte le sostanze pericolose eventualmente non degradate.

Attraverso la già citata digestione anaerobica, è possibile ottenere dalla biomassa vegetale (ma anche dai residui organici di origine animale) il biogas.

La biomassa viene chiusa all'interno di un digestore nel quale si sviluppano dei microorganismi che con la fermentazione della sostanza organica formano il cosiddetto biogas, costituito dal 50 fino al 70% da metano.

Una volta depurato dagli altri componenti, anidride carbonica soprattutto, esso si presta ad essere utilizzato come bio-metano per l autotrazione dei veicoli, per la combustione in caldaie e quindi per il riscaldamento e per la produzione di energia elettrica o termica.

Anche in questo caso la CO_2 prodotta dalla combustione del biometano, permette di pareggiare il bilancio dell'anidride carbonica emessa in atmosfera; infatti la quantità di CO_2 emessa dalla combustione del biogas è la stessa di quella fissata dalle piante.

8.2.3. Bioetanolo

Il bio etanolo si ottiene da un processo di fermentazione alcoolica, che ad opera di numerosi microorganismi consente la trasformazione dei glucidi contenuti nelle produzioni vegetali in alcool etilico (bioetanolo).

Questo prodotto può essere sicuramente utilizzato nei motori a combustione interna, e tra i prodotti alternativi derivanti dalla trasformazione della biomassa ad oggi disponibili è quello che mostra il miglior compromesso tra prezzo, disponibilità e prestazioni; in alcuni paesi del sud America viene infatti utilizzato puro in normali motori a combustione interna o additivato a benzina.

Le colture più sperimentate e diffuse fin ora sono la canna da zucchero, il grano e il mais; ma qualunque coltura ricca di saccarosio, materiali amidacei e lignocellulosici si prestano alla produzione del bio etanolo.

8.3. Produzione di energia

Attraverso vari processi termo-chimici, di combustione e digestione aerobica/anaerobica è possibile ottenere, nonché convertire, energia sotto varie forme:

8.3.1. Gassificazione

La gassificazione è un processo termochimico che permette di convertire la biomassa in combustibili gassosi che si prestano a vari usi.

Ogni impianto utilizzato per questo processo è suddiviso in tre sezioni, in ognuna delle quali avvengono altrettante fasi.

Durante la gassificazione la biomassa ancora umida viene immessa in un essiccatore per fare evaporare l'umidità in eccesso, una volta essiccata viene trasferita nel gassificatore vero e proprio dove subisce una pirolisi ,a temperature comprese tra i 700° e i 1200° C, che porta alla formazione di in un gas sintetico (il syngas) composto prevalentemente da azoto molecolare (N_2), vapore acqueo, monossido di carbonio (CO), anidride carbonica (CO_2) e metano oltre ad una piccola frazione di idrocarburi più pesanti. Successivamente il gas viene raffreddato e filtrato per eliminare le polveri, i composti organici e gli scarti formatisi durante il processo; da qui in poi può essere utilizzato come gas combustibile, ad esempio per motori o turbine che andranno ad alimentare un generatore di energia elettrica, oppure essere convertito in combustibili liquidi come etanolo.

8.3.2. Pirolisi

La pirolisi rappresenta un'ulteriore processo di decomposizione termochimica ottenuta mediante l'applicazione di calore compreso tra i 400 e gli 800° C che a differenza della gassificazione avviene in completa assenza di ossigeno. Così in condizioni anaerobiche e in ambiente ermetico per evitare la fuoriuscita dei gas, il prodotto subisce la scissione dei legami con formazione di molecole più semplici.

I prodotti ottenuti sono sia gassosi (syngas), sia liquidi (olio di pirolisi), sia solidi a seconda dei metodi di pirolisi (veloce, lenta o convenzionale) e dai parametri di reazione, e sono utilizzabili quali combustibili o materie prime destinate ad altri processi di trasformazione; ad esempio il liquido prodotto si presenta come un olio combustibile che può essere sottoposto a processi che lo rendano assimilabile a benzina e ad altri idrocarburi.

8.3.3. Combustione

L'energia dalle biomasse può sicuramente essere estratta all'interno di termovalorizzatori, attraverso la loro combustione diretta e mediante particolari procedimenti tendenti a migliorarne l'efficienza.

Quest'uso presupporrebbe però, la disponibilità di un impianto adeguato, munito di congrui dispositivi per l'abbattimento delle emissioni in atmosfera (es. elettrofiltro, Lewandowski et al., 2006).

I residui vegetali appositamente trattati e selezionati vengono impiegati come combustibile: bruciando generano vapore che aziona una turbina, quest'ultima essendo collegata ad un alternatore genera a sua volta energia elettrica.

Questo utilizzo energetico, a differenza di quanto si possa pensare, incide in maniera minore sull'ambiente rispetto alla combustione dei carburanti fossili poiché il carbonio contenuto nella pianta, nonché quello sprigionato durante la combustione sotto forma di anidride carbonica, è pari a quello utilizzato dalle piante durante il ciclo naturale del carbonio, ed inferiore a quella sprigionata dalle centrali termoelettriche in seguito alla combustione di carbon fossile o altri combustibili. Bisognerebbe comunque creare dei filtri o altri dispositivi ancora più efficaci in grado di ridurre ulteriormente i fumi e le micro polveri sprigionate a seguito del processo di combustione.

8.3.4. Digestione aerobica

In questo caso la metabolizzazione delle sostanze organiche avviene ad opera di microorganismi il cui sviluppo è condizionato dalla presenza di ossigeno.

Durante la conversione delle sostanze complesse in sostanze più semplici i batteri producono CO_2 ed H_2O, determinando un elevato riscaldamento del substrato, proporzionale all'attività microbica. Il calore prodotto può essere così trasferito all'esterno mediante l'utilizzo di scambiatori di calore. Questo tipo di tecnologia è già utilizzato in diversi paesi d'Europa per il trattamento delle acque di scarico.

8.3.5. Sistemi d'abbattimento delle emissioni

I diversi metodi impiegati per la trasformazione della biomassa, soprattutto quelli in cui è previsto l'utilizzo del calore, sono da tempo dibattuti tra le diverse parti, in termini soprattutto di impatto ambientale; per cui a completare il quadro riguardante i vari impieghi delle biomasse, meritano sicuramente di essere citati alcuni esempi, tra quelli più in voga, per l'abbattimento delle emissioni.

I sistemi di depurazione dei fumi attuali sono costituiti da varie tecnologie e sono pertanto detti multistadio. La caratteristica che li accomuna è quella di essere concepiti a più sezioni di abbattimento, ognuna in linea di massima specifica per determinati tipi di inquinanti.

A partire dagli anni ottanta si è affermata l'esigenza di rimuovere i macroinquinanti presenti nei fumi della combustione, ad esempio ossido di carbonio, anidride carbonica, ossidi di azoto e gas acidi come l'anidride solforosa.

Si è passati dall'utilizzo di sistemi, quali cicloni e multicicloni, con efficienze massime di captazione delle polveri rispettivamente del 70% e dell'85%, ai precipitatori elettrostatici (ESP) o ai filtri a maniche che garantiscono efficienze notevolmente superiori (fino al 99% e oltre).

Altri sistemi sono stati messi a punto per l'abbattimento dei microinquinanti come metalli pesanti (mercurio, cadmio, piombo ecc) e diossine.

Riguardo ai primi, presenti sia in fase solida che di vapore, la maggior parte di essi viene fatta condensare nel sistema di controllo delle emissioni e si concentra nel cosiddetto "particolato fine" (ceneri volanti). Il loro abbattimento è poi affidato all'efficienza del depolveratore (sistema di depurazione dell'aria, che cattura e rimuove le particelle solide o liquide contenute nei fumi di scarico, attraverso l'impiego di un liquido, filtri tessili o elettrofiltri) che arriva a garantire una rimozione superiore al 99% delle PM_{10} prodotte.

Per quanto riguarda l'abbattimento delle diossine e dei furani il controllo dei parametri della combustione e della post-combustione (elevazione della temperatura a oltre 850 °C), sebbene in passato fosse considerato di per sé sufficiente a garantire

valori di emissione in accordo alle normative, è oggi considerato insufficiente e quindi accompagnato (nei nuovi impianti) da un ulteriore intervento specifico basato sulle proprietà chimicofisiche dei carboni attivi.

Questo ulteriore processo viene effettuato attraverso un meccanismo di chemiadsorbimento, cioè facendo "condensare" i vapori di diossine e furani sulla superficie dei carboni attivi. In altri termini funziona come una specie di "spugna". Queste proprietà garantiscono abbattimenti dell'emissione di diossine e furani tali da premettere di operare al di sotto dei valori richiesti dalla normativa. I carboni esausti sono altamente nocivi e sono considerati rifiuti speciali pericolosi, da smaltire in discariche speciali.

- ***Filtrazione tessile***

La filtrazione tessile è un processo di abbattimento del particolato solido che si realizza facendo passare il flusso d'aria contaminato attraverso dei filtri costituiti da fibre tessili di varia natura. Una volta venivano utilizzati solo prodotti naturali, come la lana od il cotone, caratterizzati da un'efficacia ed una resistenza relativamente basse; in seguito, però, l'avvento di fibre sintetiche come il nylon ed il polipropilene ha permesso di ottenere dei nuovi materiali più resistenti al logoramento, al calore, all'erosione ed all'attacco delle sostanze corrosive. In alcuni casi vengono anche utilizzate le fibre di vetro.

Nelle varie applicazioni industriali non ci si limita all'utilizzo dei tessuti ma si impiegano anche feltri o addirittura agglomerati di fibre.

Di solito i feltri garantiscono una migliore filtrazione ma necessitano di sistemi di pulizia più complessi, mentre i tessuti vengono utilizzati con flussi d'aria a bassa velocità e necessitano di una pulizia più occasionale. Gli elementi filtranti possono essere strutturati a pannello, a cartuccia o a tasca, ma molto più frequentemente presentano una forma cilindrica, per cui si parla spesso di sacche o di maniche. I dispositivi più importanti sono sicuramente quelli a maniche per cui nella trattazione si farà quasi esclusivamente riferimento a questa particolare configurazione, anche se in definitiva quelli indicati sono tutti sistemi molto simili dal punto di vista applicativo.

Nella filtrazione tessile l'efficienza nella cattura delle polveri è variabile nel tempo a causa della stessa natura del filtro, per cui solitamente si preferisce valutare le varie prestazioni sulla base della concentrazione delle polveri in uscita; in ogni caso l'efficienza è sempre molto alta, supera il 99% e spesso raggiunge il 99,9%. Questo alto rendimento è possibile perché nell'abbattimento entrano in gioco vari fattori: ad un'azione di setaccio data dalla presenza delle fibre si aggiungono un effetto di sbarramento, un'interazione di natura elettrostatica ed un effetto di inerzia dovuto alla deviazione ed al rallentamento del flusso d'aria; la cattura del particolato di minori dimensioni è anche facilitata dal continuo moto browniano a cui sono soggette le particelle.

Da notare che la stessa deposizione delle polveri sul materiale filtrante favorisce entro un certo limite, l'ulteriore cattura di altro particolato aero disperso, ma è comunque necessario effettuare una periodica pulizia del filtro. Sulla base dei metodi utilizzati per rimuovere il deposito di polveri sugli elementi filtranti si distinguono essenzialmente tre diversi dispositivi di abbattimento:

- filtri con pulizia a scuotimento,
- filtri con pulizia ad inversione di flusso,
- filtri con pulizia a getto d'aria compressa.

Sicuramente l'osservazione ai camini di scarico risulta molto utile, in genere un aumento delle emissioni visibili sta ad indicare una riduzione nell'efficienza di abbattimento.
Uno sbuffo di polveri al camino di uscita può essere ricondotto agli elementi filtranti oppure al sistema. Le perdite possono essere dovute alla rottura dei filtri, oppure ad un problema di tenuta causato da una installazione non corretta, oppure ad un'inefficiente filtrazione dovuta al fatto che non si usano gli elementi filtranti più idonei.

- ***Precipitazione elettrostatica***

La precipitazione elettrostatica viene sfruttata principalmente per abbattere le emissioni degli inquinanti sotto forma di particolato; in condizioni ottimali è in grado di abbattere il particolato in sospensione con un'efficienza superiore al 99%.

Il processo prevede l'utilizzo di un campo elettrico ad alta tensione che provvede a caricare positivamente o negativamente le particelle solide o liquide presenti nelle emissioni gassose. Il particolato carico elettricamente va quindi a depositarsi per attrazione elettrostatica sull'elettrodo di raccolta da dove può essere rimosso come materiale secco, con operazioni di percussioni meccaniche, oppure dilavato con acqua.

Questa rimozione si rende sempre indispensabile dato che lo strato di materiale che si deposita diminuisce l'intensità di campo elettrico e quindi l'efficacia di abbattimento. Il risultato è tuttavia fortemente condizionato dalla "resistività" delle polveri, ovvero dalla capacità ad assumere le cariche elettrostatiche indotte dall'elettrodo ionizzante. A fronte di questi inconvenienti si fa a volte uso di sostanze adesive cosparse sugli elettrodi; il che comporta però la necessità di frequenti operazioni di pulizia.

Convenzionalmente i precipitatori elettrostatici si distinguono in elettrofiltri a secco se non prevedono l'utilizzo di acqua ed elettrofiltri ad umido in caso contrario. L'indicatore più diretto del rendimento dell'elettrofiltro è sicuramente l'opacità del flusso d'aria in uscita. Alcuni grandi precipitatori elettrostatici sono dotati di monitor appositi detti opacimetri che sono in grado di rilevare anche le piccole deviazioni nell'opacità media. Comunque le rilevazioni sulle emissioni visibili possono essere fatte anche a vista, risulta infatti abbastanza facile intuire un malfunzionamento dell'elettrofiltro se all'uscita compaiono degli sbuffi di fumo. L'uso di elettrofiltri ha il vantaggio di alti rendimenti anche per particelle submicroniche e una gestione relativamente semplice.

Per contro vi sono l'elevato costo di investimento, un costo non indifferente dell'energia elettrica per il funzionamento degli elettrodi e l'alto ingombro.

9. ASPETTI LEGISLATIVI

9.1. Normativa europea

L'acquis comunitario, pur contemplando disposizioni in materia di difesa del suolo, non dispone di una normativa comunitaria specifica in materia. A seguito di tale considerazione segue la proposta di direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio, che intende istituire un quadro per la protezione del suolo con modifiche alla direttiva 2004/35/CE, relativa al danno ambientale.

La proposta è finalizzata, pertanto, a colmare questa lacuna e ad istituire una strategia comune per la protezione e l'utilizzo sostenibile del suolo, basata su una serie di principi quali:

l'integrazione delle problematiche del suolo in altre politiche; la conservazione delle funzioni del suolo nell'ambito di un suo utilizzo sostenibile; la prevenzione delle minacce che incombono sul suolo e la mitigazione dei loro effetti, nonché il ripristino dei suoli degradati ad un certo livello di funzionalità.

La decisione n. 1600/2002/CE che istituisce il sesto programma comunitario di azione in materia di ambiente prevede, tra i suoi obiettivi, la tutela delle risorse naturali e l'incentivo ad un utilizzo sostenibile del suolo.

La legislazione proposta, finalizzata a proteggere il suolo e a conservarne la capacità di svolgere le funzioni ambientali, socioeconomiche e culturali è perfettamente compatibile con gli obiettivi di cui all'articolo 174 del trattato CE e tiene conto della varietà di situazioni che caratterizza le diverse regioni della Comunità.

Il testo è fondato sui principi della precauzione e dell'azione preventiva, sul principio della correzione, in via prioritaria alla fonte, dei danni causati all'ambiente e sul principio "chi inquina paga".

Finora, senza l'intervento comunitario, solo nove Stati membri (Germania, Olanda, Norvegia, Finlandia, Danimarca, Regno Unito, Italia, Austria, Belgio) dispongono di

una legislazione specifica in materia di difesa del suolo, mentre gli altri si affidano alle disposizioni di conservazione del suolo previste da politiche di altri settori.

Riguardo la tematica relativa alla decontaminazione dei suoli, gli Stati membri dovrebbero adoperarsi affinché, i siti contaminati inseriti nei rispettivi inventari nazionali, siano sottoposti a interventi di bonifica.

La stessa proposta identifica la bonifica come interventi sul suolo finalizzati ad eliminare, controllare, contenere o ridurre i contaminanti presenti in modo che il sito contaminato non rappresenti più un rischio significativo per la salute umana o per l'ambiente (Proposta di Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio, Bruxelles, 2006).

9.2. Normativa nazionale

In Italia sono state emanate in questi ultimi anni una serie di normative in materia di acque, rifiuti, aria ed una legislazione specifica sui siti inquinati. Il decreto legislativo 152/99, integrato da quello del. 258/00, rappresenta la normativa quadro in materia di acque, che recepisce le direttive europee 91/271, 91/676 e 2000/60/CE, e riordina il complesso di tutte le disposizioni in materia di inquinamento dei corpi d'acqua. La normativa prevede di arrestare o eliminare gradualmente gli scarichi, le emissioni e le perdite delle sostanze pericolose nell'arco di venti anni.

La normativa in materia di gestione dei rifiuti è riportata nel decreto legislativo 22/97 noto come "Decreto Ronchi" che accoglie le direttive europee 91/156/CE, 91/689/CE e 94/62/CE. Con il D.P.R. n. 203 del 1988 viene emanata la legge quadro in materia di qualità dell'aria in relazione a specifici agenti inquinanti e per il controllo delle emissioni prodotte da impianti industriali e da impianti termici.

Il D.P.R. è stato integrato con Regolamenti e Decreti attuativi; il più importante tra essi è il D.M. 12 Luglio 1990, che definisce le linee guida per il contenimento delle emissioni di sostanze inquinanti dagli impianti industriali e fissa i valori minimi, in taluni casi anche in relazione alla tipologia di attività.

A complemento del D.P.R. 203/88 è intervenuta la normativa sull'inquinamento atmosferico generato dagli impianti per l'incenerimento dei rifiuti con i D.M. 503/97 e D.M. 124/00, che riguardano rispettivamente le emissioni provocate da incenerimento di rifiuti urbani e speciali, e le emissioni da incenerimento di rifiuti pericolosi.

Limiti più restrittivi ai fumi dei grandi impianti di combustione e riduzioni a tutte le emissioni in atmosfera di biossido di zolfo, ossidi di azoto, composti organici volatili e ammoniaca, sono previsti da due nuove direttive europee, la 2001/80/CE e la 2001/81/CE, che sono state poste in vigore a partire dal 27 novembre 2002.

La legge 426/98 sui "*Nuovi interventi in campo ambientale*" fa riferimento all'articolo 18 della legge 22/97, individuando un primo gruppo di Siti Inquinati di interesse nazionale.

La legge predispone inoltre un Programma Nazionale di Bonifica e Ripristino Ambientale dei Siti Inquinati, nel quale si propone di individuare "gli interventi prioritari, i soggetti beneficiari, i criteri di finanziamento dei singoli interventi e le modalità di trasferimento delle risorse".

Il Programma è stato emanato con D.M. n. 468 del 18 Settembre 2001 e pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 16 Gennaio 2002; in esso, oltre allo schema di assegnazione delle risorse disponibili per la bonifica, messa in sicurezza e ripristino ambientale sono contenute anche schede descrittive dei singoli siti interessati dal Programma stesso. Il D.M. 471/99 è stato emanato in attuazione dell'articolo 17 del decreto legislativo 22/97 ed è un Regolamento recante criteri, procedure, modalità per la messa in sicurezza e il ripristino ambientale dei siti inquinati.

Attualmente la legislazione in vigore fa riferimento ai decreti legislativi 133/2005 e 152/2006. Il decreto legislativo 133/2005 stabilisce i limiti di emissione per gli impianti di incenerimento dei rifiuti. Il decreto legislativo 152/2006 stabilisce i limiti di emissione negli scarichi idrici, i limiti generali di accettabilità delle emissioni in atmosfera, i limiti di emissione in atmosfera per specifiche tipologie di impianti, i limiti per i composti organici volatili ed i valori di concentrazione soglia di contaminazione nel suolo, nel sottosuolo e nelle acque sotterranee.

All’interno della parte quarta, Titolo V (artt. 239-253), del D.Lgs. n.152/06 sono contenute le disposizioni in materia di bonifiche. Art. 239: << *Il presente titolo disciplina gli interventi di bonifica e ripristino ambientale dei siti contaminati e definisce le procedure, i criteri e le modalità per lo svolgimento delle operazioni necessarie per l'eliminazione delle sorgenti dell'inquinamento e comunque per la riduzione delle concentrazioni di sostanze inquinanti, in armonia con i principi e le norme comunitari, con particolare riferimento al principio "chi inquina paga"* >>. Il principio generale ispiratore della norma è dunque “chi inquina paga” e prevede, in sintesi, che le responsabilità della bonifica e del ripristino di un sito contaminato ricadano su chi ha causato l’inquinamento.

A livello Nazionale sono stati individuati i siti d’interesse nazionale (SIN); si tratta di aree del territorio italiano definite in relazione alle caratteristiche del sito, alle quantità e pericolosità degli inquinanti presenti, all’impatto sull’ambiente circostante in termini di rischio sanitario ed ecologico e di pregiudizio per i beni culturali ed ambientali. I SIN sono individuati e perimetrati con Decreto del Ministro dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, d’intesa con le regioni interessate e si differenziano da altri siti contaminati perché la loro procedura di bonifica è di pertinenza del Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, che può avvalersi anche dell’APAT, delle ARPA, dell’ISS ed altri soggetti.

Oltre ai SIN è stata realizzata l’anagrafe dei siti contaminati che sono numerosissimi, circa 15.000. Si tratta di un documento predisposto dalle regioni e dalle province autonome che contiene l’elenco dei siti sottoposti ad intervento di bonifica per i quali sono previsti il ripristino ambientale, l’individuazione dei soggetti cui compete la bonifica, gli enti pubblici di cui la regione intende avvalersi in caso d’inadempienza dei soggetti obbligati ai fini dell’esecuzione d’ufficio.

10. CONCLUSIONI

Il lavoro svolto nell'ambito della tesi, tenendo in forte considerazione le questioni legate alla tutela dell'ambiente quale cardine per uno sviluppo eticamente corretto e sostenibile, ha messo in risalto le gravi problematiche legate al territorio in cui vivo, causate dall'incuria di chi specula sulle risorse naturali e sulla vita delle persone senza preoccuparsi delle conseguenze sulle presenti e future generazioni.

L'elaborato descrive una tecnica di recente applicazione quale la phytoremediation che, grazie alla capacità di alcune specie vegetali di accumulare o degradare i contaminanti presenti nel suolo, permette di bonificare i terreni inquinati dalle attività industriali, altrimenti inutilizzabili a causa dei gravi rischi per la salute.

Sono state illustrate le pratiche agronomiche che ne migliorano l'efficienza, effettuato un confronto con i più comuni metodi di bonifica, soprattutto in termini di impatto ambientale ed economico, e sono stati descritti i vantaggi e gli aspetti limitanti di questa tecnica.

Con riferimento all'AERCA di Siracusa, sono state individuate le specie più adatte alle caratteristiche di questo territorio in grado di produrre una rilevante quantità di biomassa in condizioni di ridotti input energetici. È stata inoltre predisposta una scheda tecnica con le informazioni relative alle esigenze e alle pratiche colturali delle specie già sperimentate con successo in altri programmi di bonifica e suscettibili di essere utilizzate nel nostro ambiente come la canna comune, il vetiver, il cardo, il ricino, alcune brassicacee, la festuca, la canapa ed il girasole.

Sono state, infine, descritte le possibili utilizzazioni e trasformazioni della biomassa contaminata per la produzione, secondo la concezione di "bioraffineria", di biomateriali, biocombustibili e bioenergia.

Dallo studio bibliografico è emerso che questa tecnica, specialmente in ambito nazionale ed internazionale è ancora in fase di perfezionamento. Seppur sono state ampiamente riconosciute e dimostrate le capacità di ripristino ambientale di numerose specie, la maggior parte delle prove sperimentali sono state condotte in

laboratori o in impianti pilota e quindi in condizioni ben diverse da quelle riscontrabili in campo.

Ulteriori studi e sperimentazioni si rendono necessari per il perfezionamento di questa tecnologia: occorre approfondire le conoscenze sui processi fisiologici al fine di migliorare l'efficienza fitoestrattiva o di fitodegradazione delle piante nei confronti dei diversi contaminanti; ricercare, soprattutto attraverso l'osservazione delle specie presenti nei siti contaminati, nuove colture che presentino una buona adattabilità alle condizioni ambientali dell'area in esame; attraverso prove di pieno campo, mettere a punto la tecnica colturale e predisporre i protocolli di coltivazione delle specie individuate; definire e implementare i processi e gli impianti industriali per la trasformazione della biomassa contaminata in prodotti innovativi e sostenibili.

Considerando i vantaggi economici e ambientali della phytoremediation ed il supporto dei risultati delle ricerche che si condurranno nei nostri ambienti, ritengo sia auspicabile una sua applicazione nei programmi di bonifica dei suoli contaminati nei Siti di Interesse Nazionale presenti in Sicilia. Ritengo, inoltre, che questa tecnica, grazie alle ricadute positive sul territorio, nei settori dell'agricoltura sostenibile e delle attività industriali ad essa connesse, potrà contribuire significativamente al risanamento ed alla riqualificazione sociale e occupazionale delle aree industriali siciliane.

BIBLIOGRAFIA

1. Argese E., Rigo C. e Gamper U., 2005. Studio sul bioaccumulo di metalli pesanti in specie vegetali di un sito contaminato. XV Congresso della Società Italiana di Ecologia, Torino.
   URL: http://www.ecologia.it/congressi/XV/articles/Argese-314.pdf
2. ARPA Umbria, 2012. Bonifica, recupero ambientale e sviluppo del territorio: esperienze a confronto sul fitorimedio. Atti del convegno. URL:http://www.arpa.umbria.it/resources/documenti/pubblicazioni/Atti_convegno_fitorimedio_web.pdf
3. Baglivo F., Marella G., Saccomandi F. Phytoremediation: metodologie, parametri e protocollo d'applicazione. A.P.A.T.
4. Begonia MT., Begonia GB., Ighoavodha M., Gilliard D., 2005. Lead accumulation by tall fescue (Festuca arundinacea Schreb.) grown on a lead-contaminated soil.
   URL: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16705822
5. C.N.R. Istituto di Biologia Agro-ambientale e Forestale. Le piante per il fitorimedio. URL: http://www.ibaf.cnr.it/phyto/sito.pdf
6. Copani V., Testa G., Scordia D., 2009. "Valutazione di nuove specie per destinazioni energetiche negli areali meridionali". Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agrarie e Alimentari (DISPA) – Università degli Studi di Catania.
7. Copani V, Cosentino S.L, Testa G, Guarnaccia P., Litrico A., 2009. *Propagation of Arundo donax L. by means of rhizomes and stem cuttings in semi-arid Mediterranean environment*. In: 17th European Biomass Conference and Exhibition. From research to industry and markets. Hamburg, Germany, 29 June - 3 July. FIRENZE: ETA-FLORENCE, p. 595-598, ISBN/ISSN: 978-88-89407-57-3
8. COSENTINO S.; COPANI V; PATANE' C; MANTINEO M; D'AGOSTA G.M (2007). Le colture da biomassa per energia per gli ambienti italiani. Attualità e prospettive. In: ACCADEMIA DEI GERGOFILI. Produzione di

energia da fonti biologiche rinnovabili: le risorse primarie. vol. II, p. 1-34, FIRENZE, Accademia dei georgofili.

9. EPA United States Environmental Protection Agency, 2012. Using Phytoremediation to clean up sites.
   URL: http://www.epa.gov/superfund/accomp/news/phyto.htm
10. EPA. A Citizen's Guide to Phytoremediation, 2012.
    URL:http://www.cluin.org/download/citizens/a_citizens_guide_to_phytoremediation.pdf
11. Fattorini M., 2009. Sette erbacce, presto carburanti per auto. URL: http://www.italiachiamaitalia.net/news/133/ARTICLE/17919/2009-10-04.html
12. Foti S., Cosentino S., Patanè C., Guarnaccia P., 1997. *"Land suitability" di colza (Brassica napus L. var. oleifera D.C.) e sorgo zuccherino (Sorghum bicolor (L.) Moench) in Sicilia.* Riv. di Agronom., 31, 454-464.
13. Giacinto F. e Solarino L., 5 novembre 2009. "Le indagini nell'area a rischio di Augusta e Siracusa". Dossier per il convegno dell'OMS.
14. Lai T. Tecniche di Phytoremediation per la bonifica dei suoli contaminate.URL:
    http://www.image.unipd.it/iat/ASA/Presentazioni/7b20Lai%20%20Phytoremediation
15. Madeddu A. e Franco G., 2007. Registri Tumori di Siracusa, Dossier mercurio e impianti cloro soda, Legambiente.
16. Mameli A., 2007. Un rimedio verde contro i metalli pesanti. URL: http://www.sardegnaricerche.it/index.php?xsl=370&s=44968&v=2&c=3283&vd=2
17. Ministero Attività Produttive, 2004. Rapporto Osservatorio per il settore chimico.
18. Non solo aria. I Sistemi di Abbattimento degli Inquinanti Aerodispersi. URL: http://www.nonsoloaria.com/siab1.htm
19. Pasquon I., e Zanderighi L., 1987. La Chimica Verde. Le utilizzazioni dei prodotti vegetali e le biotecnologie. Editore Urlico Hoelpi Milano.

20. Peng S., Zhou Q., Cai Z. e Zhang Z., 2009. Phytoremediation of petroleum contaminated soils by Mirabilis Jalapa L. in a greenhouse plot experiment. URL: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19346069
21. Pinna M., Spagnolo S. e Gamba U., 2007. Caratteristiche agronomiche e possibilità di utilizzo di Brassica juncea (L.). URL: http://orgprints.org/15241/1/bollettino_03_07_brassica.pdf
22. Pool L. Cornwall., luglio 2003. The royal society of chemistry environmental chemistry group. Bulletin.
URL: http://www.rsc.org/images/scaf0030703_tcm18-9785.pdf
23. Prasad M.N.V., 2007. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) a potential crop for environmental industry. Helia, 30, nr. 46, 167-174.
24. Prati armati srl. Società di ricerca – bioingegneria – tecnologie ambientali, 2004. Phytoremediation.
URL: http://www.vetiver.it/Vetiver_it_file/phytoremediation.pdf
25. Prezzo J., e Dare S., 2010. Phytoremediation-using plants to remove toxins.
URL:http://homeopathtyler.wordpress.com/2010/06/18/phytoremediation-using-plants-to-remove-toxins/
26. Research Centre on Environmental Methodologies and Technologies. Phytoremediation, 2001.
URL:http://www.metea.uniba.it/database/tecnologie/pytoremediation.htm
27. Truong P., Tan Van T. e Pinners E., 2008. Applicazione del sistema vetiver, manuale tecnico di riferimento.
Vetiver Network International. 2° edizione.
URL:http://www.scribd.com/doc/43383065/Vetiver-manuale-tecnico-di-applicazione
28. U.N.E.P. United Nations Environment Programme.
Phytoremediation: An Environmentally Sound Technology for Pollution Prevention, Control and Redmediation.
URL: http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/Freshwater/FMS2/3.asp
29. Vignudelli M. Phytoremediation impiego di specie vegetali per la bonifica di suoli contaminati da metalli pesanti. Università di Bologna, Facoltà di Agraria.
URL: http://www.dista.unibo.it/person/rossi/fitorem.pdf.